

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий  
Направление подготовки 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств  
Отделение Машиностроения

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА**

<b>Тема работы</b>
4-х координатный управляемый стол с волновым редуктором для станков с ЧПУ УДК 62-503.55:621.941-216:621.833.3

Обучающийся

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4НМ11	Манапова Марина Савировна		

Руководитель ВКР

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор	Крауиньш П.Я.	Д.т.н., профессор		

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН	Маланина В.А.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ООД	Антоневич О.А.	к.б.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

<b>Руководитель ООП/ОПОП, должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОмШ	Бибик В.Л.	к.т.н.		

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

по основной образовательной программе подготовки магистров по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»,  
профиль подготовки «Конструирование технологического оборудования»  
ИШНПТ ТПУ, отделение машиностроения, руководитель ООП Бибик В. Л.

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования в области конструкторско-технологической подготовки машиностроительных производств, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки исследований
ОПК(У)-2	Способен разрабатывать современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы

ОПК(У)-3	Способен использовать современные информационно-коммуникационные технологии, глобальные информационные ресурсы в научно-исследовательской деятельности
ОПК(У)-4	Способен подготавливать научно-технические отчеты и обзоры по результатам выполненных исследований и проектно-конструкторских работ в области машиностроения
ОПК(У)-5	Способен организовывать и осуществлять профессиональную подготовку по образовательным программам в области машиностроения
ОПК(У)-6	Способен разрабатывать и применять алгоритмы и современные цифровые системы автоматизированного проектирования производственно-технологической документации машиностроительных производств
ОПК(У)-7	Способен организовывать подготовку заявок на изобретения и промышленные образцы в области конструкторско-технологической подготовки машиностроительных производств.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способен проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по отдельным разделам темы
ПК(У)-2	Способен проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по тематике организации
ПК(У)-3	Способен осуществлять инструментальное обеспечение механосборочного цеха
ПК(У)-4	Способен разрабатывать архитектуры гибких производственных систем в машиностроении
ПК(У)-5	Способен автоматизировать и механизировать производственные процессы механосборочного производства
ПК(У)-6	Способен использовать современные психолого-педагогические теории и методы в профессиональной деятельности

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств

Отделение Машиностроения

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП/ОПОП

\_\_\_\_\_ Бибик В.Л.  
(Подпись) (Дата) (ФИО)

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

Обучающийся:

Группа	ФИО
4НМ11	Манапова Марина Савировна

Тема работы:

4-х координатный управляемый стол с волновым редуктором для станков с ЧПУ	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	Приказ №37-49/с от 06.02.2023

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	21.05.2023
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b> <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 функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i>	Разработка конструктивной схемы 4-х координатного управляемого стола для станков с ЧПУ с волновым кинематическим редуктором с модифицированным профилем зуба. Провести кинематические и динамические исследования, проанализировать равномерное вращение передачи, нагрузочную способность, с использованием виртуальной модели.
--	--

<p><b>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке</b>  <i>(аналитический обзор литературных источников 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>Литературно-патентный обзор мехатронных устройств, конструкций возможных редукторов, исследование зацепления с предлагаемым профилем зуба, рассмотрение технологических возможностей предлагаемого устройства.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Конструктивные схемы, графики анализов зубчатого зацепления, виртуальные модели.</p>

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

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Маланина Вероника Анатольевна
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна
Английский язык	Тайдонова Светлана Сергеевна

**Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:**

«Литературный обзор»

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p align="center">01.12.2022</p>
--	----------------------------------

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

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Крауиньш Пётр Янович	д.т.н., профессор		

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ11	Манапова Марина Савировна		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4НМ11	Манаповой Марине Савировне

<b>Школа</b>	<b>Новых производственных технологий</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>Машиностроение</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Бюджет проекта – не более 410000 руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 230000 руб.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Значение показателя интегральной ресурсоэффективности – не менее 4 баллов из 5.</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Ставка отчислений на социальные нужды – 30,2% от ФОТ.</i>

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

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Потенциальные потребители результатов исследования</li> <li>– Анализ конкурентных технических решений</li> <li>– SWOT-анализ</li> <li>– Оценка готовности проекта к коммерциализации</li> </ul>
2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Структура работ в рамках научного исследования</li> <li>– Основная заработная плата</li> <li>– Отчисления во внебюджетные фонды</li> <li>– Накладные расходы</li> <li>– Формирование бюджета затрат научно-технического проекта</li> </ul>
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Оценка сравнительной эффективности проекта</li> </ul>

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

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Матрица SWOT
5. График проведения и бюджет НТИ
6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Маланина Вероника Анатовна	к.э.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ11	Манапова Марина Савировна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
4НМ11		Манапова Марина Савировна	
<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Отделение Машиностроения</b>
<b>Уровень образования</b>	магистратура	<b>Направление/специальность</b>	<i>15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств</i>

Тема ВКР:

<i>4-х координатный управляемый стол с волновым редуктором для станков с ЧПУ</i>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</li> </ul>	<p><i>Объект исследования: 4-х координатный управляемый стол с волновым редуктором</i></p> <p><i>Область применения: машиностроение, автоматизация производств</i></p> <p><i>Рабочая зона: офисное помещение</i></p> <p><i>Размеры помещения: 3*8</i></p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны: стол, стул, ПЭВМ</i></p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Организация рабочего места должна удовлетворять требованиям СанПин 2.2.3670-20</li> <li>– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)</li> <li>– ГОСТ 12.2.032-7 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования</li> <li>– ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</li> </ul>



<p><b>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</li> <li>– Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора</li> </ul>	<p>1) Анализ выявленных вредных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Повышенный уровень шума.</li> <li>– Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения.</li> <li>– Отклонение показателей микроклимата.</li> <li>– Электромагнитные поля промышленных частот.</li> </ul> <p>2) Анализ выявленных опасных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Электрический потенциал</li> <li>– Повышенное образование электростатических зарядов.</li> </ul> <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: звукоизоляция помещений, соблюдение нормативных шумовых характеристик на рабочих местах, оборудование помещений защитным заземлением, наличие регламентированных перерывов.</p> <p>Расчет: расчет системы искусственного освещения</p>
<p><b>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения</b></p>	<p>Воздействие на литосферу: утилизация неисправных и устаревших ПЭВМ. Загрязнения атмосферы и гидросферы не обнаружено.</p>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения</b></p>	<p>Возможные ЧС: пожар; обрушение каркаса здания; взрыв Наиболее типичная ЧС: пожар</p>
<p><b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b></p>	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ11	Манапова Марина Савиловна		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 124 страницы, 69 рисунков, 26 таблиц, 40 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: координатный стол, волновой редуктор, малогабаритный станок, нагрузочная способность, несущая способность.

Объектом исследования (разработки) является 4-х координатный управляемый стол для станков с ЧПУ.

Цель работы – разработка принципиальной конструктивной схемы 4-х координатного управляемого стола с волновым редуктором для станков с ЧПУ

В ходе работы проводились: поиск литературы и патентов по теме, разработка конструктивной схемы 4-х координатного управляемого стола с волновым редуктором и создание его модели в среде SolidWorks, модификация профиля зубьев шестерни и колеса; проведены исследования на плавность хода, нагрузочную и несущую способность передачи, путь трения и качение зубьев.

В результате исследований получены получен модифицированный профиль зуба, графики нагружения зубьев, нормального распределения, зависимости контактных деформаций, изменения пути трения и качения.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: управляемый стол с четырьмя степенями свободы для расширения технологических возможностей малогабаритных станков с ЧПУ

Степень внедрения: предложенное устройство возможно внедрять в современные предприятия

Область применения: машиностроение, мехатроника

Экономическая эффективность/значимость работы определена путем оценки научно-технического уровня исследования

В будущем планируется использовать тему для исследований и внедрения в различные отрасли промышленности.

## Оглавление

Введение.....	13
Актуальность работы.....	13
Цель работы.....	14
1. Литературный обзор.....	16
1.1. Мехатронное устройство.....	16
1.2. Поворотно-фиксирующие механизмы.....	17
1.3. Зубчатые передачи.....	21
1.4. Патентный обзор.....	31
2. Основная часть.....	33
2.3. Конструктивная схема.....	33
2.4. Модификация зуба.....	37
2.5. Проверка плавности хода.....	42
2.6. Нагрузочная способность передачи.....	46
2.8. Несущая способность зуба.....	54
2.9. Прочностной расчет зуба.....	57
2.10. Путь трения.....	59
2.11. Качение зубьев.....	62
2.12. Рабочая зона механизма.....	64
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	67
3.1. Предпроектный анализ.....	68
3.2. Инициация проекта.....	74
3.3. Планирование управления научно-техническим проектом.....	76
3.4. Оценка сравнительной эффективности исследования.....	85
3.5. Заключение по разделу.....	86

4. Социальная ответственность .....	88
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности...	88
4.2 Производственная безопасность .....	91
4.3 Экологическая безопасность .....	99
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	100
4.5 Заключение по разделу .....	101
Заключение .....	102
Список литературы .....	104
Приложение А .....	109

## **Введение**

Каждый день в мире появляется множество промышленных разработок, которые являются следствием технологических революций. Мировая индустрия активно использует автоматизацию, роботизацию и прочие возможности для развития производства.

Если говорить отдельно о машиностроении и мехатронике, с большой скоростью растет нужда в высокой точности позиционирования технологического оборудования, в передаче повышенных усилий, в разработке новых идей и концепций, особенно для тех механизмов и машин, которые раньше считались почти стандартизированными. Такими устройствами можно назвать координатные столы, в основе которого лежит редуктор.

Большая часть редукторов, используемых на производствах и отвечающих заданным характеристикам, имеют в основе эвольвентный профиль зуба по причине простоты изготовления и ценовой доступности. Но передачи с подобным профилем имеют ряд минусов, к которым можно причислить иногда недостаточную кинематическую точность и неспособность получения высоких передаточных отношений.

## **Актуальность работы**

Почти во всех сферах производства есть необходимость осуществлять точное и плавное движение рабочего органа или обрабатываемой детали по заданным траекториям. При этом нет нужды иметь высокоточный или очень жесткий станок, эту задачу можно решить другими способами.

Координатный стол представляет собой мехатронную производственную установку, оснащенную приводами, информационно-измерительными устройствами и системой управления, предназначен для точного перемещения обрабатываемой детали/рабочего органа в процессе выполнения технологической операции.

Использование средств компьютерного управления и подготовки управляющих программ позволяет практически полностью автоматизировать процесс производства на базе координатного стола и существенно повысить производительность и стабильность качества выпускаемой продукции.

Волновой редуктор с обновленным профилем зуба является безлюфтовым, имеет увеличенную несущую способность, и поэтому устройство, предложенное в работе, имеет применение в высокоточных системах обработки, может расширить технологические возможности оборудования.

В силу выбранных габаритов устройства, обработку предпочтительнее производить на малогабаритных станках, например, гравировальных станках фрезерной группы.

### **Цель работы**

Целью работы является разработка принципиальной конструктивной схемы 4-х координатного управляемого стола с волновым редуктором для станков с ЧПУ.

Для достижения заданной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести литературный обзор с целью определения основных характеристик стола и редуктора.
2. Создать модель в среде SW и показать принцип работы.
3. Построить профили шестерни и колеса редуктора, исключая интерференцию.
4. Найти передаточное отношение.
5. Проверить передачу на плавность хода.
6. Провести анализ изменения площади контакта при равномерном вращении.
7. Провести прочностной расчет зуба.
8. Определить нагрузочную способность передачи.

9. Провести анализ распределения Пуансона.

## **1. Литературный обзор**

### **1.1. Мехатронное устройство**

Мехатронное устройство – это устройство, разработанное в результате синергии элементов точной механики, электроники, компьютерного управления и предназначенное для осуществления управляемых движений его выходных звеньев.

В зависимости от уровня интеграции элементов мехатронного устройства и его функционального назначения различают:

- мехатронные модули;
- мехатронные машины;
- мехатронные системы;
- мехатронные комплексы.

Мехатронный модуль – это функционально и конструктивно самостоятельное изделие, построенное с взаимопроникновением и синергетической аппаратно-программной интеграцией составляющих его элементов, имеющих различную физическую природу, и предназначенное для реализации требуемого управляемого функционального движения его выходного звена. [1]

Первичным признаком, отличающим мехатронные устройства, является наличие трех обязательных частей: механической (электромеханической), электронной и компьютерной. Вторым признаком является использование принципа минимума преобразований – использование высокомоментных или линейных двигателей. Так же в устройстве должен быть использован принцип совмещения функций – одному элементу заданы несколько задач. [2]

Мехатронное устройство включает в себя:

- Механизм, состоящий из корпуса, привода и выходного механического звена. Последнее может включать силовой элемент, механическую передачу движения, рабочий орган и т.д.;
- усилитель мощности силового элемента;



- устройство управления усилителем мощности;
- внутреннюю информационную систему (датчики состояния самого мехатронного узла, средства обработки информации с датчиков);
- внешнюю информационную систему (сенсоры информации о внешней среде мехатронного узла, средства обработки этой информации);
- устройство управления мехатронным узлом.

Методами концептуального конструирования мехатронных систем являются: метод параллельного проектирования, предполагающий одновременное проектирование блоков мехатронной системы; метод модульного проектирования позволяющий из отдельных блоков-модулей компоновать сложные системы модульной архитектуры; метод перераспределения функциональной нагрузки от механической подсистемы (МПС) к электронной подсистеме (ЭПС) что позволяет существенно упростить МПС и увеличить функциональность системы за счет гибкости управляющих алгоритмов; метод визуализации процессов с использованием систем виртуальной реальности позволяющий прогнозировать поведение сложной технической системы на этапе ее проектирования. [10]

Примерами современных мехатронных устройств являются модули станков и промышленных роботов, устройства внешней памяти компьютеров, принтеры, бытовая техника и т. п. Мехатронное устройство может быть либо машиной, либо узлом (функциональный элемент, модуль) машины. [11]

## **1.2. Поворотно-фиксирующие механизмы**

В автоматах и полуавтоматах, агрегатных станках и автоматических линиях широко применяются различные механизмы поворота с последующей фиксацией положения поворачиваемого узла.

Устройства для перемещения инструмента используют при последовательной обработке детали набором различных инструментов, а также при необходимости автоматической замены быстроизнашиваемого инструмента. [4]

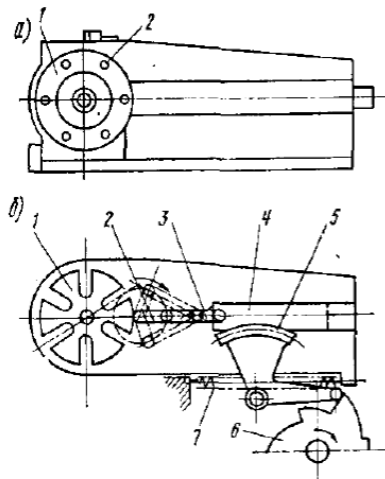


Рис.1. Пример поворотного устройства – револьверная головка автомата 1Б136.

К поворотно-фиксирующим устройствам относятся следующие группы целевых узлов:

- 1) Поворотные устройства, на которых крепят инструменты или заготовки (качающиеся приспособления, револьверные головки, поворотные столы и т.д.);
- 2) Механизмы измерения ориентации, на которых производят поворот обрабатываемых заготовок на заданный угол для последующей обработки с другой стороны (столы для поворота деталей на  $90^\circ$  и  $180^\circ$  вокруг вертикальной оси, барабаны для поворота деталей на  $90^\circ$  и  $180^\circ$  вокруг горизонтальной оси, поворотные лотки и т.д.);
- 3) Приводные механизмы поворотных устройств, обеспечивающие поворот устройств и его останов;
- 4) Фиксирующие механизмы, обеспечивающие точность положения инструментов или заготовок.

К таким устройствам существует огромное множество требований:

1. Быстрота и точность установки в рабочую позицию инструмента и детали;
2. Плавность поворота;

3. Недопустимость ударов и толчков при работе механизма, так как это приводит к износу и потери прочности.
4. В конце поворота скорость узла должна равняться нулю – это устраняет удар по фиксатору, который должен остановить движущийся по инерции узел, повышает точность и надежность работы механизма.

### **1.2.1. Координатные столы**

Координатный стол – это специальная мехатронная установка, служащая для точного перемещения по требующейся траектории механизма станка или обрабатываемой детали. На сегодняшний день координатный стол объединяет в себе несущую опору, электронную систему управления, приводы и механизм назначения. Благодаря применению цифрового ЧПУ производственный процесс оказывается автоматизированным. При высокой скорости работы точность производства детали оказывается в пределах единиц микрон.

Обычно поворотные столы состоят из:

- Основание – аналог станины, имеет системы крепления к зоне обработки станка.
- Планшайба – место для крепления заготовки. На ее поверхности находятся пазы для установки заготовок, в центре либо прямое отверстие, либо конус Морзе.
- Механизм перемещения – для перемещения конструкции на необходимое расстояние.



Рис.2. Поворотный стол Haas HRT450.



Рис. 3. Поворотный стол с ЧПУ с прямым приводом FAD-200.

Чем больше осей вращения, тем больше возможностей для обработки заготовки с разных сторон без необходимости остановок для изменения положения детали, соответственно, время переустановки уменьшается, увеличивается эффективность.

Системы ЧПУ поворотного стола расширяют спектр возможных обработок, с их помощью появляется возможность создавать детали особо сложных конфигураций, например, спиральных канавок и т.д.

## 1.3. Зубчатые передачи

### 1.3.1. Общие сведения

Зубчатая передача – это механизм, который с помощью зубчатого зацепления передает или преобразует движение с изменением угловых скоростей и моментов. [8]

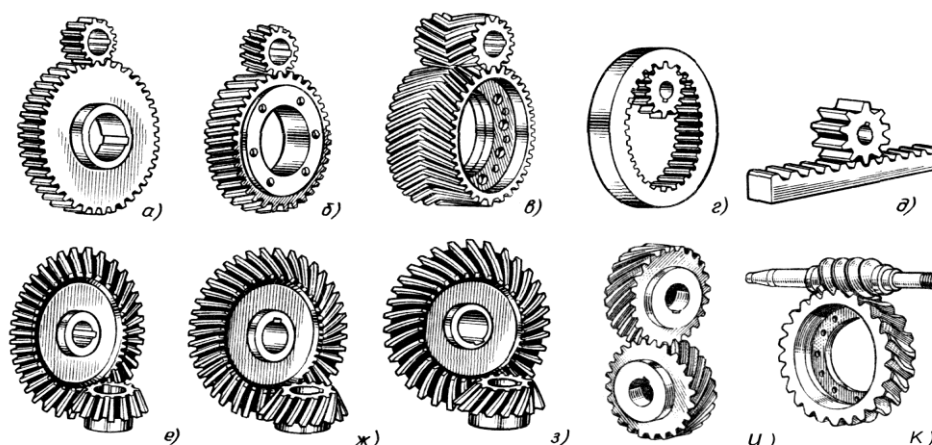


Рис. 4. Виды зубчатых передач: а, б, в – цилиндрические зубчатые передачи с внешним зацеплением; г – цилиндрическая передача с внутренним зацеплением; д – реечная передача; е, ж, з – конические зубчатые передачи; и – винтовая передача; к – червячная передача.

В зубчатом зацеплении меньшее зубчатое колесо пары называется шестерней, а большее – зубчатым колесом или просто колесом. Зубчатая передача состоит из колес с зубьями, которые сцепляются между собой, образуя ряд последовательно работающих кулачковых механизмов.

Зубчатые передачи применяют для преобразования и передачи вращательного движения между валами с параллельными, пересекающимися или перекрещивающимися осями, а также для преобразования вращательного движения в поступательное и наоборот.

Такие передачи являются самыми распространенными в нынешнем машиностроении и приборостроении, они применяются в обширных диапазонах скоростей и мощностей.

Главные достоинства зубчатых передач:

- постоянство передаточного отношения  $i$ ;
- надежность и долговечность работы;
- компактность;
- большой диапазон передаваемых скоростей;
- небольшое давление на валы;
- высокий КПД;
- простота обслуживания.

В качестве недостатков зубчатых передач можно учитывать:

- необходимость высокой точности изготовления и монтажа;
- шум при работе со значительными скоростями; [8]
- невозможность бесступенчатого регулирования передаточного отношения  $i$ ;
- высокая жесткость, не дающая полностью компенсировать динамические нагрузки;
- необходимость в особом оборудовании и инструментах для нарезания зубьев.

### **1.3.2. Основные законы зацепления**

Для нормальной, плавной работы зубчатой пары с постоянным передаточным числом, профиль зубьев шестерни и колеса должен быть оформлен по кривым, образованным по определенным законам. Эти законы являются следствием теоремы зацепления.

Основную теорему зацепления (теорему Виллиса) можно сформулировать так: профили, передающие вращение между параллельными осями с отношением угловых скоростей, изменяющимся по заданному закону, должны быть таковы, чтобы общая нормаль к профилям в точке их касания проходила через мгновенный полюс зацепления. [7]

Мгновенный полюс зацепления – это точка на линии межцентрового расстояния, делящая его на отрезки, находящиеся в отношении, обратно

пропорциональном отношению мгновенных угловых скоростей. Т.е., для постоянного отношения скоростей мгновенный полюс остается постоянным в неподвижной плоскости.

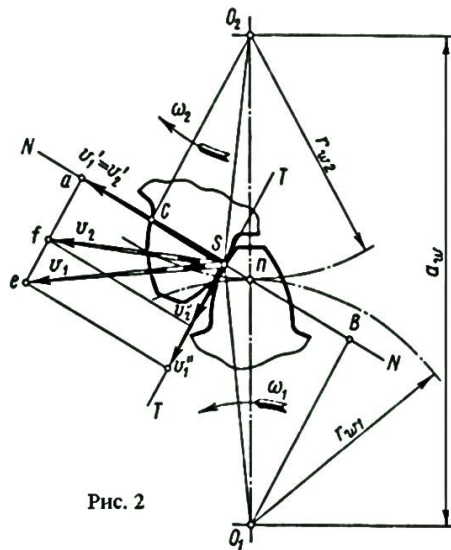


Рис. 2

Рис. 5. Элементы зубчатого зацепления.

В процессе работы профилей точка касания постоянно перемещается по прямой NN. Эта прямая является линией зацепления.

### 1.3.3. Эвольвентное зацепление

Большая часть зубчатых передач, используемых в наше время, имеют зубчатые колеса с эвольвентными профилями зубьев.

Эвольвентное зацепление было впервые предложено Л. Эйлером. Эвольвентой окружности называется ее развертка. Окружность, эвольвента которой используется для профиля зуба, называется основной окружностью или эволютой.

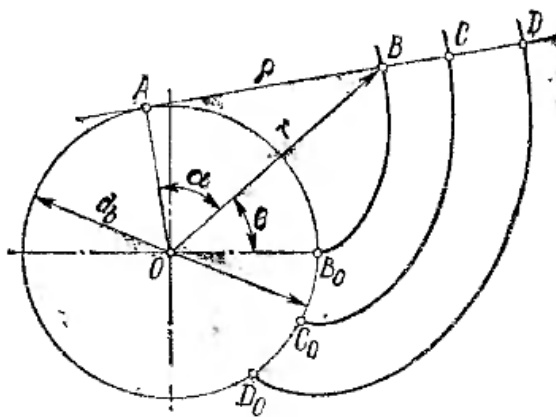


Рис. 6. Эвольвента окружности.

Эвольвентное зацепление является линейчатым, контакт профилей происходит по линии, расположенной вдоль зуба.

Характер и параметры зацепления определяются такими свойствами эвольвенты, как:

- нормаль к эвольвенте в любой точке является касательной к основной окружности;
- длина отрезка АВ нормали к эвольвенте равна длине дуги АВ<sub>0</sub> основной окружности;
- точка А основной окружности есть центр кривизны эвольвенты в точке В;
- все эвольвенты одной и той же окружности эквидистантны.

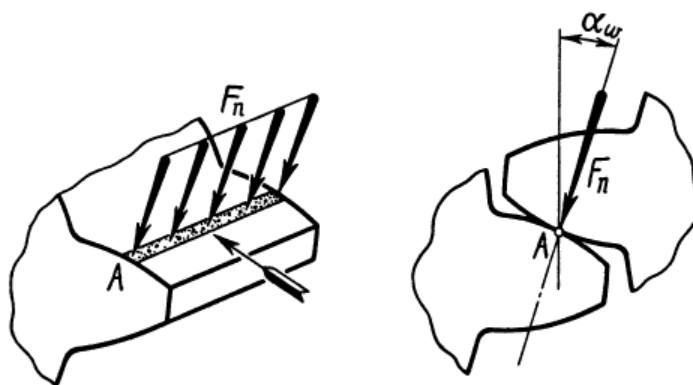


Рис. 7. Схема движения контактной площадки в эвольвентном зацеплении.

К основным достоинствам зацепления Эйлера можно отнести:



- простота зуборезного инструмента, работающего по методу обкатки, как следствие – повышенная точность изготовления;
- постоянное передаточное отношение. Полнос зацепления неизменно находится на линии центров, линия зацепления проходит по касательной к основным окружностям;
- постоянные усилия в зацеплении и опоре при постоянной мощности, т.к. линия зацепления представляет из себя прямую;
- плавность и бесшумность работы;
- долговечность и простота обслуживания.

В качестве недостатков эвольвентного зацепления можно назвать:

- сложный ремонт;
- при высоких скоростях создают повышенный шум и вибрации;
- малая контактная прочность: оба зуба имеют выпуклый профиль.

#### **1.3.4. Зацепление Новикова**

М.Л. Новиковым было предложено новое точечное зацепление, в котором профили зубьев в торцовом сечении очерчены по дугам окружности, это увеличивает приведенный радиус кривизны, повышая контактную прочность передачи.

Причем, с этой формой возможно два варианта:

- Одна шестерня с вогнутыми сферическими зубьями, а вторая с выпуклыми.
- Смешанная схема, когда профиль зуба составлен из двух сферических линий, а не одной.

В таком зацеплении контакт проходит в точке, зубья касаются только в момент прохождения профилей через эту точку, непрерывность передачи обеспечивается винтовой формой зубьев. Именно поэтому зацепление Новикова может быть только косозубым с углом  $\beta = 15 \dots 20^\circ$ . [10]

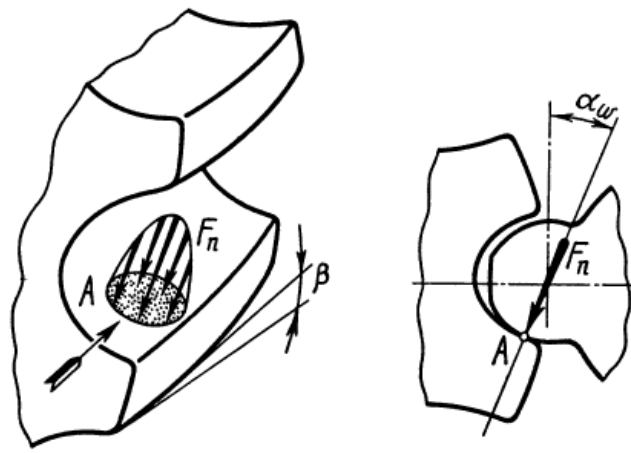


Рис. 8. Схема движений контактной площадки в зацеплении Новикова.

Благодаря новой форме зуба удалось поднять предельную нагрузку на 50%. Таким образом, редуктор с шестернями Новикова будет иметь в полтора-два раза меньшие габариты и массу при той же нагрузке, что и обычный. Их производство требует переделки обычных зуборезных станков, но техническая сложность этого небольшая. На отлаженной технологической линии себестоимость производства шестерен Новикова мало отличается от классических редукторов.

Было замечено, что пятно контакта, через которое передается нагрузка, в шестерне с классическим профилем зубьев невелико. Классическая трапецевидная форма зубьев была выбрана многими конструкторами еще на заре эры машиностроения, и она представляет собой компромиссный вариант между нагрузочной способностью, технологичностью в производстве и легкости в проектировании.

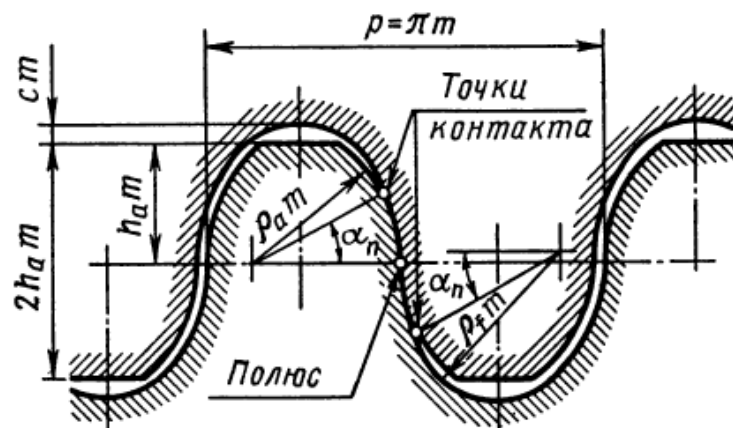


Рис. 9. Исходный контур передачи Новикова.

Преимущества такого зацепления:

- использование более высоких передаточных чисел;
- увеличенная контактная и изгибная прочность;
- высокий срок службы и уменьшение потерь на трение в силу удержания смазки в местах контакта;
- высокий КПД передачи.

Существенным недостатком таких передач можно назвать повышенную чувствительность к изменению межосевого расстояния и колебаниям нагрузок.

### **1.3.5. Волновые передачи**

На сегодняшний день в мире используется огромное количество типовых конструкций волновых механизмов. Часто такие механизмы входное вращательное движение в выходное вращательное или поступательное.

Волновые передачи основаны на принципе передачи вращательного движения за счет бегущей волновой деформации одного из зубчатых колес. Кинематически – это планетарная передача с одним гибким зубчатым колесом. [11]. Такая передача была запатентована американским инженером Массером в 1959 г.

Самая распространенная волновая передача состоит из водила Н, вращающегося гибкого колеса 1 с наружными зубьями и неподвижного жесткого колеса 2 с внутренними зубьями. [10]

Водило представляет собой овальный кулачок и особый шарикоподшипник. Гибкое колесо обычно изготовлено в форме стакана с тонкой стенкой, которая легко деформируется, стакан соединяют с валом. Длина стакана близка к его диаметру. Жесткое зубчатое колесо соединено с корпусом. Зубья колес чаще всего эвольвентные.

Сборку зацепления осуществляют после деформирования гибкого колеса водилом. Деформированный зубчатый венец гибкого колеса принимает

овальную форму, образуя при этом как бы два сателлита, связанных гибкой стенкой стакана. [10]

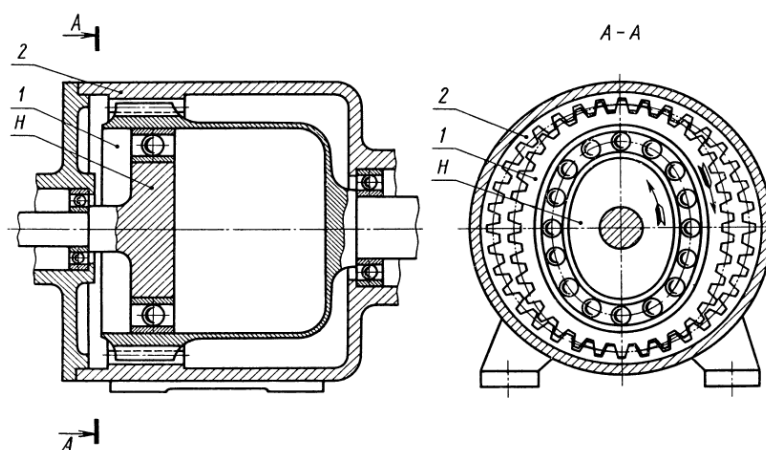


Рис. 10. Схема волновой передачи.

Гибкое колесо деформируется так, что на концах большой оси овала зубья зацепляются на полную рабочую высоту. На малой оси зубья не зацепляются. Между этими участками зацепление неполное, частичное. Волновая передача может обеспечить одновременное зацепление большого числа зубьев.

В волновой передаче преобразование движения осуществляется за счет деформирования зубчатого венца гибкого колеса. При вращении водила волна деформации бежит по окружности гибкого зубчатого венца; при этом венец обкатывается в обратном направлении по неподвижному жесткому колесу, вращая стакан и вал. Поэтому передача называется волновой, а водило — волновым генератором. [10]

Волновые передачи обладают некоторыми преимуществами перед эвольвентным зацеплением: у них меньше масса и габариты, большая кинематическая точность, меньший мёртвый ход, высокая вибропрочность за счёт демпфирования (рассеяния энергии) колебаний, они создают меньший шум.

При необходимости такие передачи позволяют передавать движение в герметичное пространство без применения уплотняющих сальников, что

особенно ценно для авиационной, космической и подводной техники, а также для машин химической промышленности.

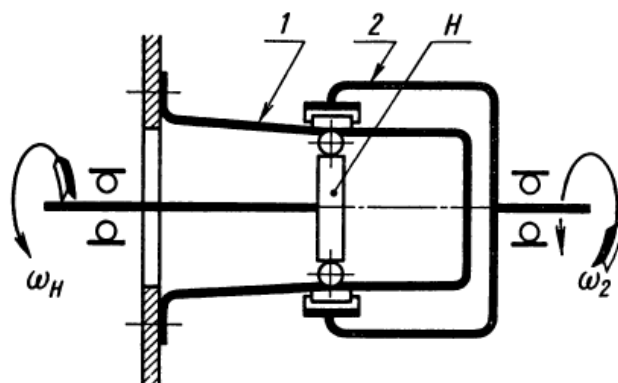


Рис. 11. Схема волновой передачи движения в герметизированное пространство.

Можно выделить несколько достоинств волновых передач:

- возможность передачи больших нагрузок при меньших габаритах, так как в зацеплении одновременно находится до трети всех зубьев;
- большое передаточное число при малых габаритах и относительно высоком КПД;
- малый мертвый ход и высокая кинематическая точность;
- возможность передачи движения в герметизированное пространство без применения уплотнений;
- работа с меньшим шумом и высокой способностью к демпфированию;
- малый приведенный к входному валу момент инерции.

Недостатки:

- гибкое колесо и волновой генератор имеют сложную конструкцию, которая дорога в изготовлении;
- возможность использования этих передач только при сравнительно невысокой угловой скорости вала генератора при больших диаметрах колес;

- ограниченные обороты ведущего вала (во избежание больших центробежных сил инерции некруглого генератора волн; мелкие модули зубьев 1,5-2 мм).

### 1.3.6. Цевковые редукторы

Такие редукторы имеют в основе упрощенное циклоидальное зацепление. Зубья выполняются в виде цилиндров (цевок), закрепленных между двумя дисками. Профиль зуба второго колеса описывается по эквидистанте, смещенной относительно эпициклоида на величину радиуса цевки (рис.).

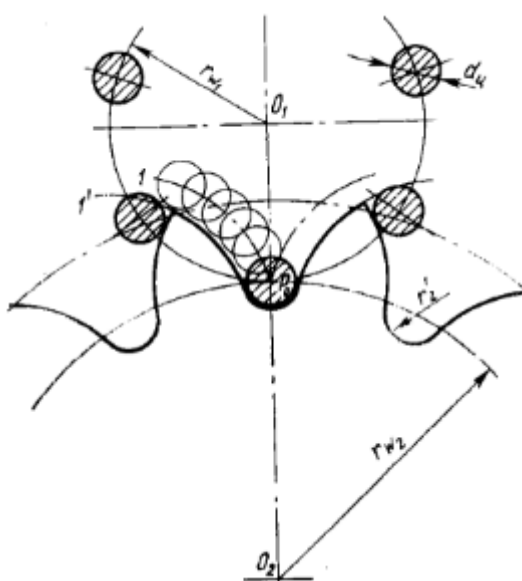


Рис. 12. Контур цевковой передачи.

Так же профиль зуба колеса может иметь форму дуги окружности (рис.), близкой к эпициклоиде. Цевки выполняют в механизмах неподвижными и вращающимися на осях. В последнем случае значительно снижаются потери на трение, однако конструкция колес становится более сложной. [11]

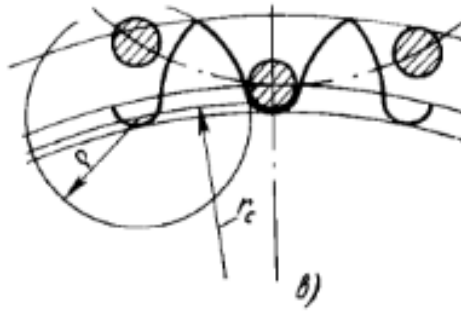


Рис. 13. Контур с профилем колеса в форме дуги окружности.

Главным достоинством цевочного зацепления является простота конструкции и изготовления цевочных колес больших размеров, а недостатком – невысокая точность. Передачи с таким зацеплением используют в приборах в основном как мультипликаторы. Кроме того, цевочное зацепление применяют в планетарных редукторах с большими передаточными отношениями, а также в промежуточных приводах цепных конвейеров в горной промышленности, в различных счетчиках и других механизмах.

#### 1.4. Патентный обзор

Зубчатая передача состоит из выходного подвижного колеса поз. 1 и шестерни поз. 2, внешний контур которой выполнен с  $n$  полуцилиндрическими выемками с возможностью зацепления с  $n+1$  полуцилиндрическими выступами-зубьями на внутреннем контуре выходного подвижного колеса поз. 1. Радиус полуцилиндрических выемок и выступов зубьев одинаков и равен значению эксцентриситета  $e/2$ , а грани полуцилиндрических выемок внешнего контура шестерни поз. 2 выполнены с фасками, длина которых равна значению эксцентриситета  $0,7e$ . [14]

Предложенное решение использовалось в волновом кинематическом редукторе, содержащем подвижное колесо поз. 1, шестерню поз. 2, входной эксцентричный вал поз. 3, пальцы поз. 4, эксцентрики поз. 5, опоры поз. 6. Шестерня поз. 2 установлена на эксцентриках поз. 5 и эксцентрики входного эксцентрикового вала поз. 3. Пальцы поз. 4 и эксцентрики поз. 5 установлены

в опорных отверстиях опоры поз. 6. Через сквозные отверстия на шестернях поз. 1 и опорах поз. 6 установлены пальцы поз. 4 и эксцентрики поз. 5. Эксцентриситет входного эксцентрикового вала поз. 3 и эксцентриков равен межосевому расстоянию  $e$  подвижного колеса поз. 1 и шестерни поз. 2. [14]

Волновой кинематический редуктор с предложенной зубчатой передачей работает следующим образом. Вращение входного эксцентрикового вала поз. 3 приводит в движение шестерню поз. 2, обкатывающуюся по пальцам поз. 4. Эксцентрики поз. 5 вращаются относительно оси отверстий опор поз. 6. Шестерня приобретает два движения: поступательное и вращательное, передавая это сложное движение, полуцилиндрические выступы зубьев шестерни поз. 2 входят в зацеплении с полуцилиндрическими выемками выходного подвижного колеса поз. 1. Выходное подвижное колесо поз. 1 обкатывается по опорным подшипникам [14].

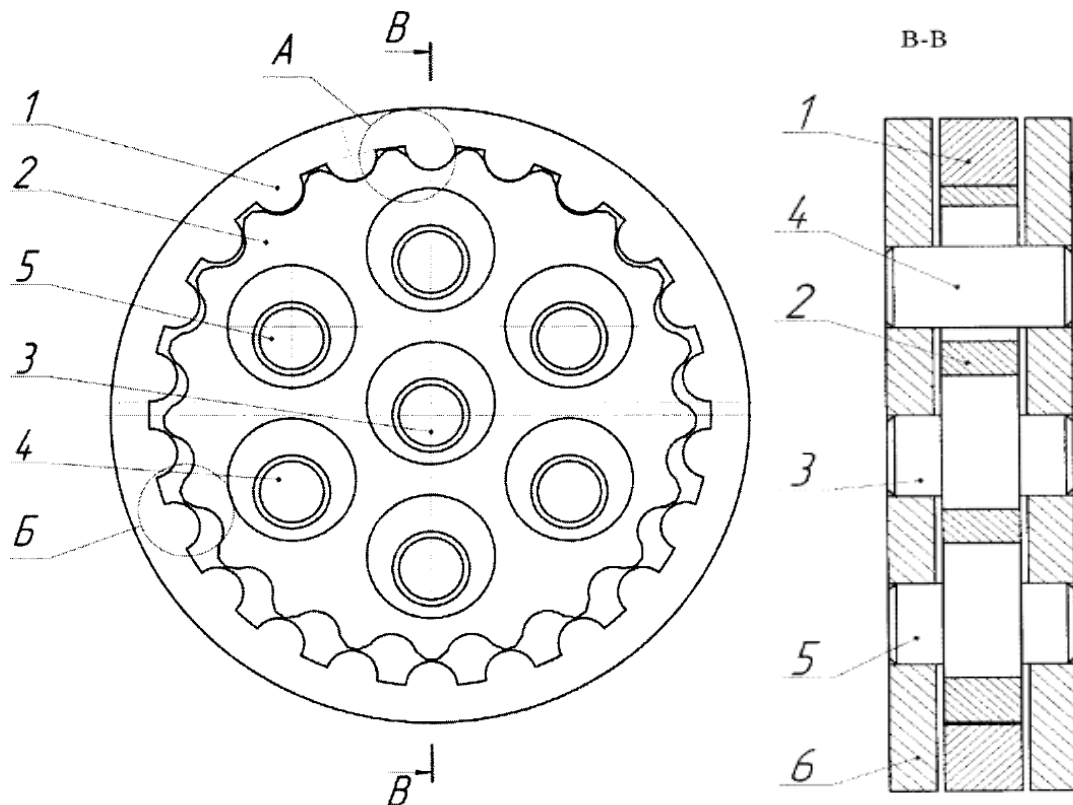


Рис. 14. Волновая передача.



## 2. Основная часть

### 2.3. Конструктивная схема

Мехатронное устройство в виде координатного стола с волновым кинематическим редуктором представляет собой компактный малогабаритный механизм, который будет эксплуатироваться для автоматизации производства. Смысл разработки – возможность обработки малогабаритных деталей сложной конфигурации, например, гравировка под углом, недоступным для 3х осевых станков; расширение степеней свободы станков. С его помощью можно значительно увеличить технологические возможности малогабаритных станков. Такое устройство состоит из шагового двигателя (на схеме не показан), редукторов, кронштейнов и самого стола.

Суть его работы заключается в следующем: шаговые двигатели, управляемые специальными драйверами деления шага, передают

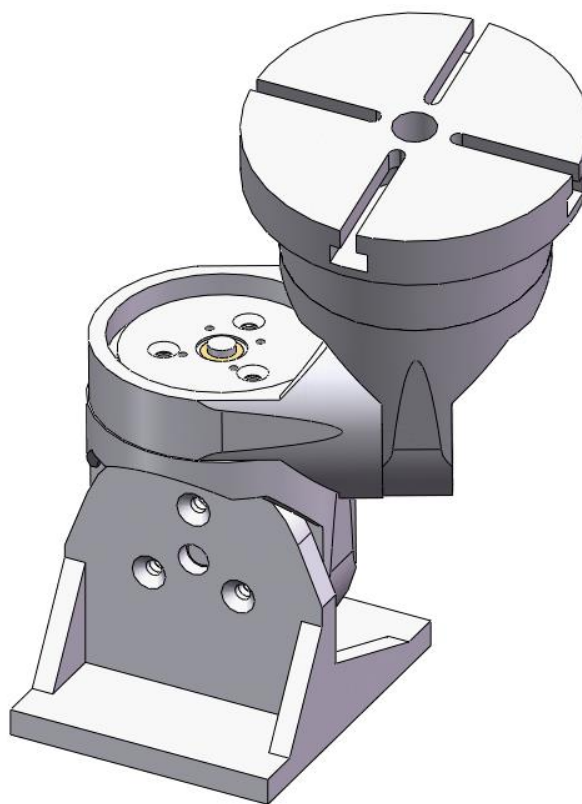


Рис. 15. Конструктивный вид предложенного мехатронного устройства.

Стол спроектирован таким образом, что выходное звено может располагаться относительно основания различными способами, чему способствуют редукторы и кронштейны, расположение которых показано на рис. 16.

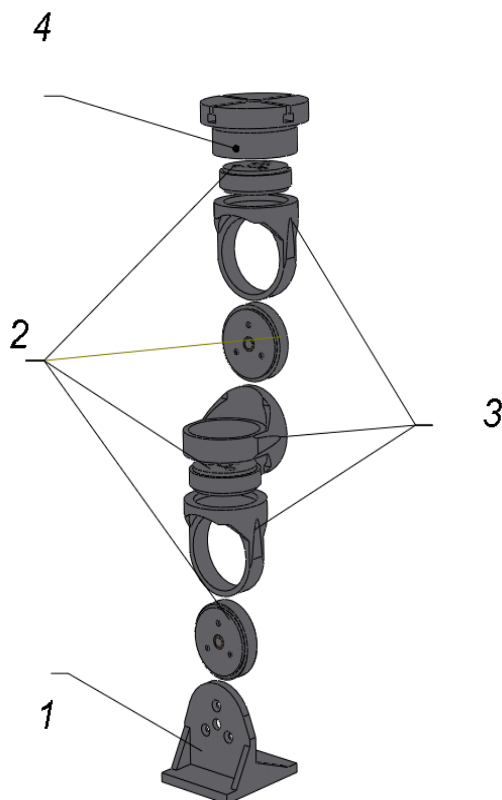


Рис. 16. Разнесенный вид стола. 1 – кронштейн-основание; 2 – редуктор с модифицированным профилем зуба; 3 – кронштейн поворотный; 4 – поворотный стол.

Сам стол поз. 4 представляет из себя планшайбу, на поверхности которой выполнены Т-образные пазы. Эти пазы используются совместно с упорами или крепежными винтами для того, чтобы прижать обрабатываемую деталь к плоскости стола.

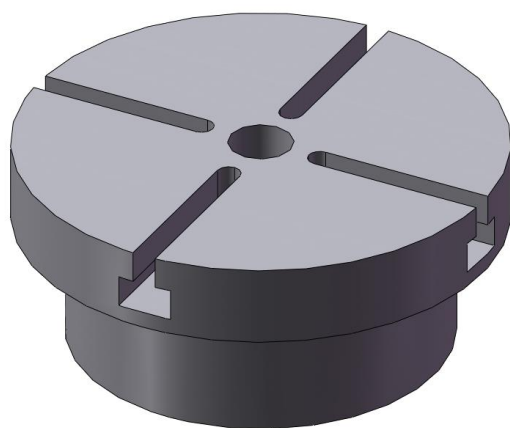


Рис. 17. Модель поворотного стола.

Ближе рассмотрим кронштейны:

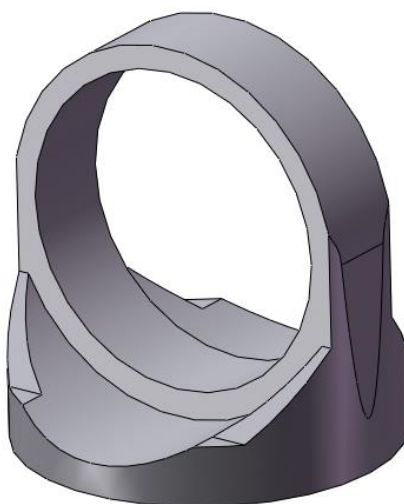


Рис. 18. Модель поворотного кронштейна.

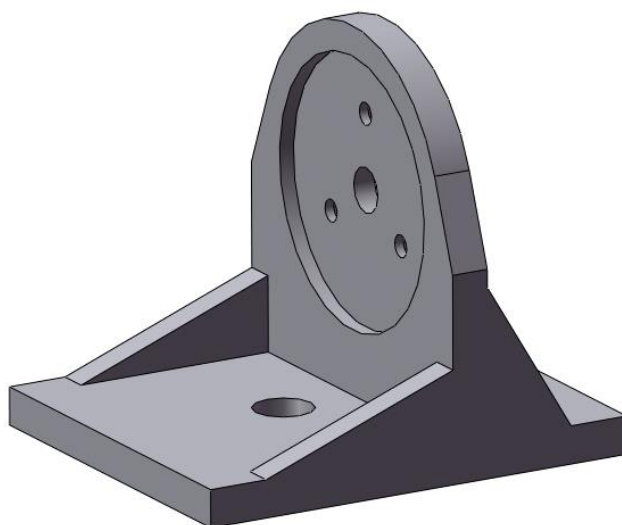


Рис. 19. Модель кронштейна-основания.

Рассмотрим главный компонент 4-х координатного управляемого стола – волновой кинематический редуктор. Его разнесенный вид представлен на рис. 20.

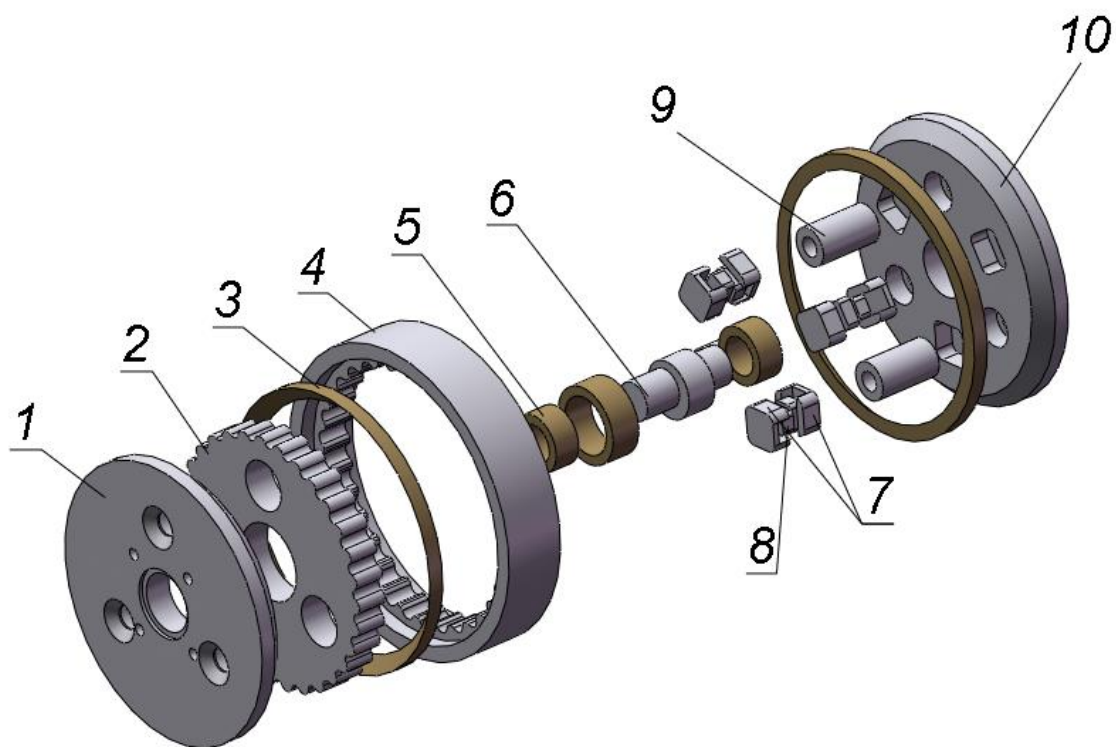


Рис. 20. Разнесенный вид волнового кинематического редуктора. 1 – корпус; 2 – шестерня; 3 – подшипник; 4 – зубчатое колесо; 5 – втулка; 6 – вал-эксцентрик; 7 – направляющие; 8 – крепеж; 9 – втулка распорная; 10 – корпус.

Передача работает таким образом. Вращение входного эксцентрикового вала поз. 6 приводит в движение шестерню поз. 2, обкатывающуюся по втулкам поз. 5. При вращении входного вала-эксцентрика поз. 6, вращение шестерни, которая двигается как бы сканирующим движением, передается колесу.

Количество зубьев колеса на один зуб больше шестерни, из этого следует, что за один оборот вала-эксцентрика, колесо повернется на один зуб. Передаточное число этого редуктора можно найти по формуле:

$$i = \frac{z_2}{z_2 - z_1} = \frac{31}{31 - 30} = 31 \quad (1)$$

У предложенного редуктора профиль зубьев шестерни и колеса модифицирован, похож на Новиковский профиль. Благодаря такой форме зуба, новый профиль дает возможность получения передачи с разницей количества зубьев колеса и шестерни в один зуб, что и является отличительной особенностью такой модификации, позволяя использовать максимально возможное передаточное отношение в необходимых габаритах.

В следствие изменения профиля зуба, улучшаются некоторые характеристики зацепления: увеличивается площадь касания зубьев шестерни и колес, возрастает плавность работы передачи, тем самым увеличивая нагрузочную способность зацепления, так как нагрузка распределяется не на один зуб, а на большее количество.

Предложенное мехатронное устройство не имеет кинематической погрешности, так как у редукторов, включенных в такую установку, нет люфтов. Силовая погрешность, в связи с тем, что в зацеплении редукторов участвует сразу несколько зубьев, уменьшена, но при нагрузках определенной величины не исключена. Так как такой управляемый стол предназначен для малогабаритных станков, обработки мелких деталей сложной конфигурации, при заведомо больших нагрузках возможна упругая деформация стола, и, как следствие, выявление кинематической погрешности.

Так как волновой редуктор в предложенном мехатронном устройстве занимает главную роль, необходимо провести исследование для уточнения кинематики и выявления ошибочной геометрии.

#### **2.4. Модификация зуба**

Профиль зубьев Новикова в типичном варианте имеет довольно сложный профиль: впадины и зубья передачи имеют разные радиусы и разное

расстояние от осей формообразующих кривых. Помимо этого, контакт в таких зацеплениях осуществляется в точке.

В работе предлагается следующий вариант профиля зубьев для волнового кинематического редуктора с профилем, близким к профилю Новиковского зубчатого зацепления (рис. 21).

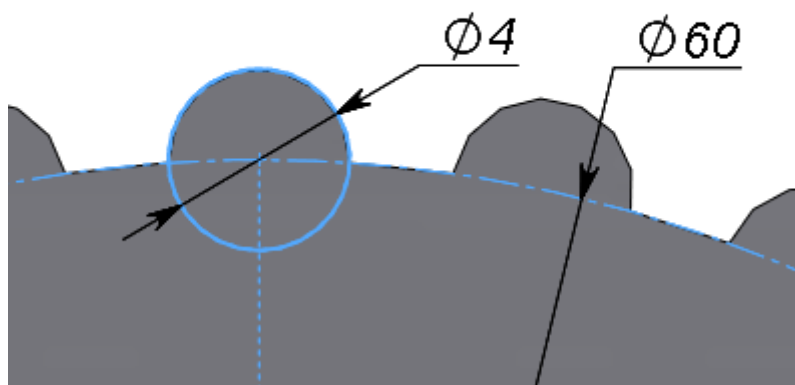


Рис. 21. Предложенный профиль зуба шестерни.

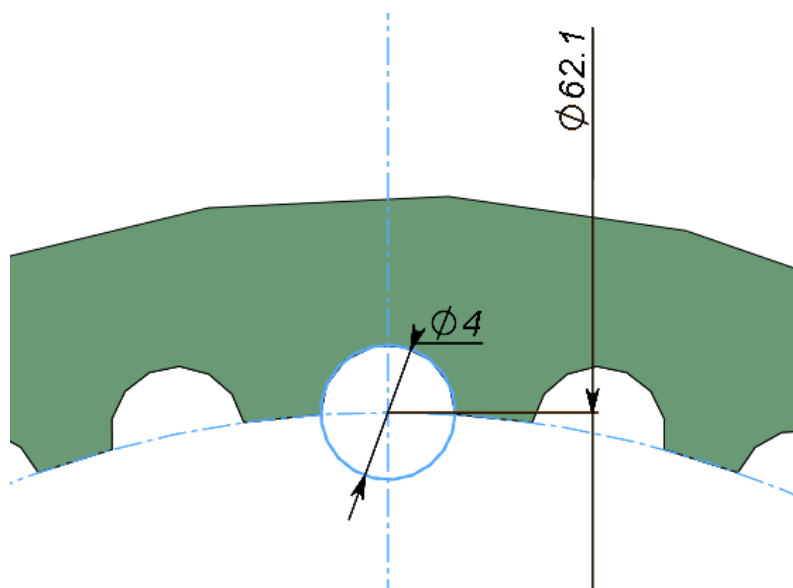


Рис. 22. Предложенный профиль зуба колеса.

На рис. 21-22 показано первое приближение нового профиля зуба.

Для этого в программном обеспечении SolidWorks создадим твердотельную сборочную модель волнового редуктора и проведем исследование.

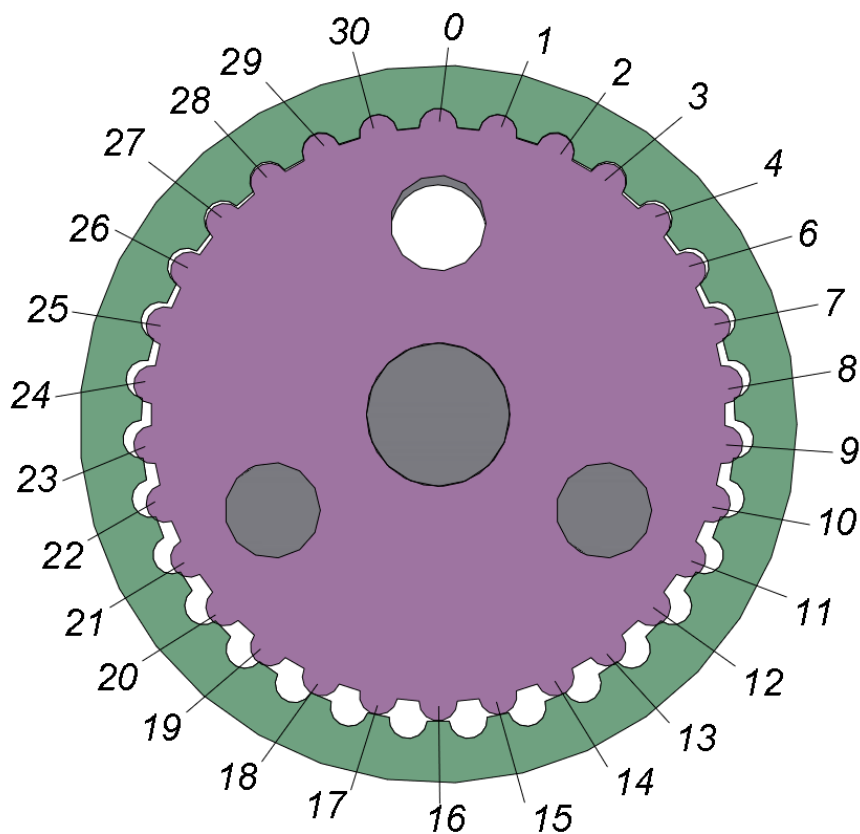


Рис. 23. Модель для исследования.

На рис. 23. видно, что предложенный волновой кинематический редуктор не сможет входить в зацепление и совершать полноценную передачу движения поскольку зубья будут врезаться друг в друга, передача просто не соберется. Для правильной работы механизма необходимо ее модернизировать и устранить конструктивную интерференцию.

Подобная практика по устранению интерференции проводилась множество раз. В ее ходе необходимо подрезать колесо, создавая тем самым радиальный зазор в зацеплении.

Рассмотрим интерференцию в положении «0» редуктора до подрезки, здесь мы можем увидеть области, в которых зубья врезаются друг в друга (рис. 24).

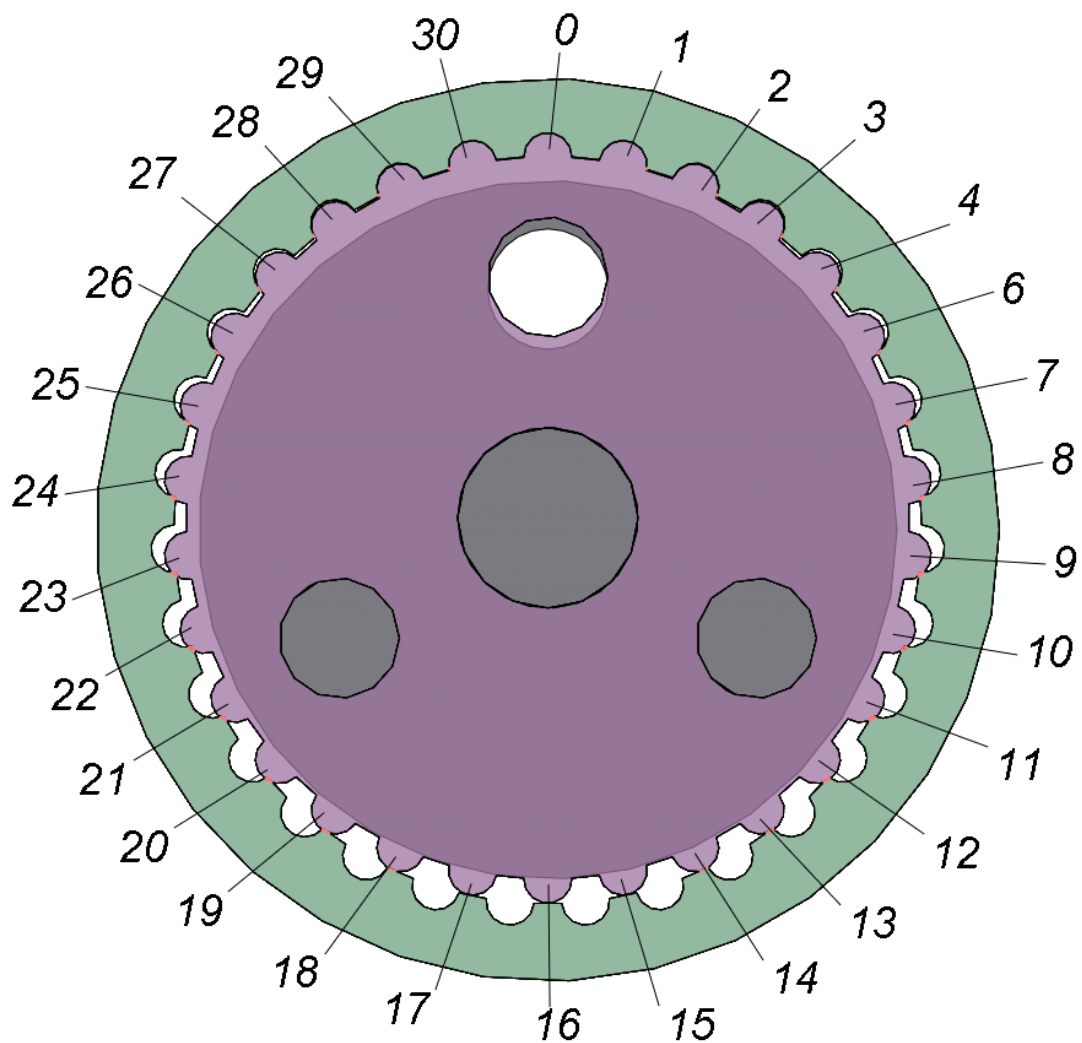


Рис. 24. Врезание зубьев в положении «0».

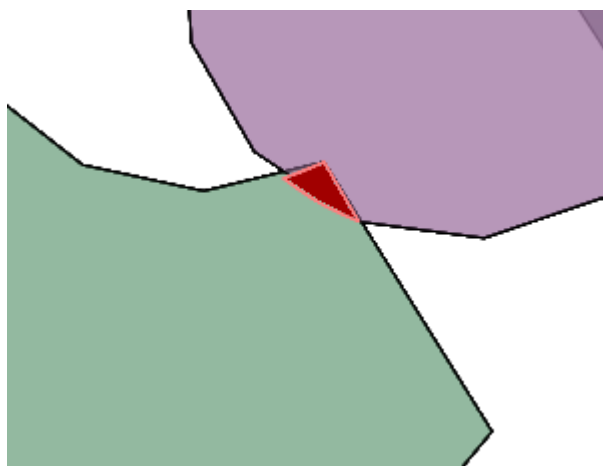


Рис. 25. Увеличенный фрагмент врезания.

Чтобы получить радиус подрезки, проведем окружность, касательную к двум ближайшим зубьям и окружности впадин (рис. 26).



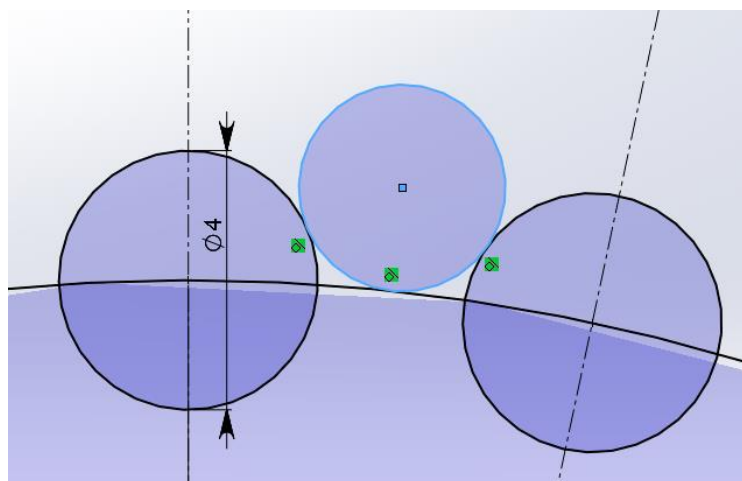


Рис. 26. Касательная окружность к двум соседним зубьям.

Далее эту окружность отсекаем и получаем радиус скругления между двумя зубьями, в нашем случае он равен 1,6 мм.

Таким образом, мы получаем контур с высокой плавностью работы и большим запасом прочности в силу большей площади касания.

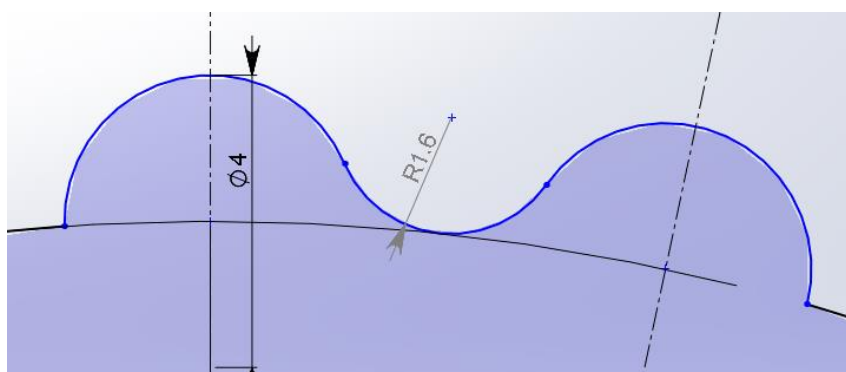


Рис. 27. Полученный радиус.

Проверка интерференции после изменения исходных параметров контура показывает, что конструктивная интерференция полностью отсутствует (рис. 28).

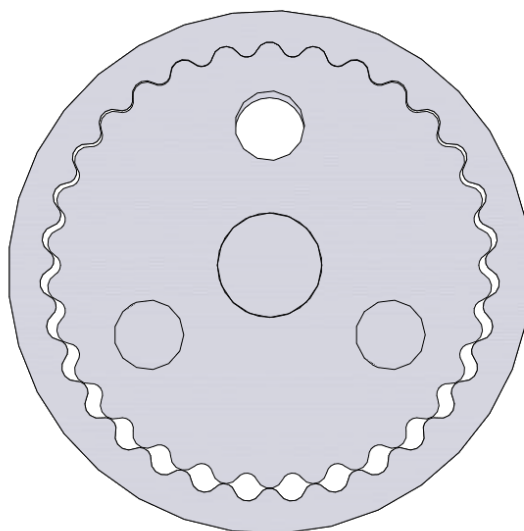
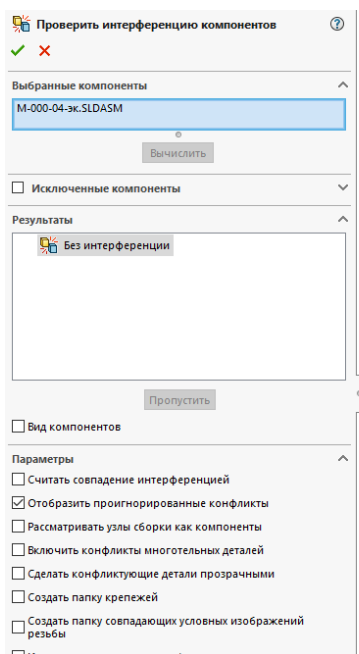


Рис. 28. Итог устранения конструктивной интерференции.

Если менять размеры скруглений профиля зубьев, будет меняться угол обхвата. А между ним и работоспособностью пары имеется прямая зависимость.

## 2.5. Проверка плавности хода

После устранения интерференции в заданной паре зацепления, проведем исследование на проверку плавности хода. В этом исследовании необходимо выяснить, будет ли возникать интерференция при поворотах вала-эксцентрика. Для этого исследования выполним полный оборот вала-эксцентрика.

Получается, угол, на который повернется вал-эксцентрик за один зуб колеса:

$$\varphi_1 = \frac{360}{z_2} = \frac{360}{31} = 11.6^\circ \quad (3)$$

При повороте вала-эксцентрика на этот угол ( $\varphi_1 = 11.6^\circ$ ), нулевой зуб колеса повернется на:

$$\varphi_2 = \frac{360}{z_2^2} = \frac{360}{31^2} = 0.37^\circ \quad (4)$$

Разделим  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  на 20 равных частей для получения множества точек для построения графика.

Для проведения исследования используем SolidWorks. Модель представлена на рисунке ниже.

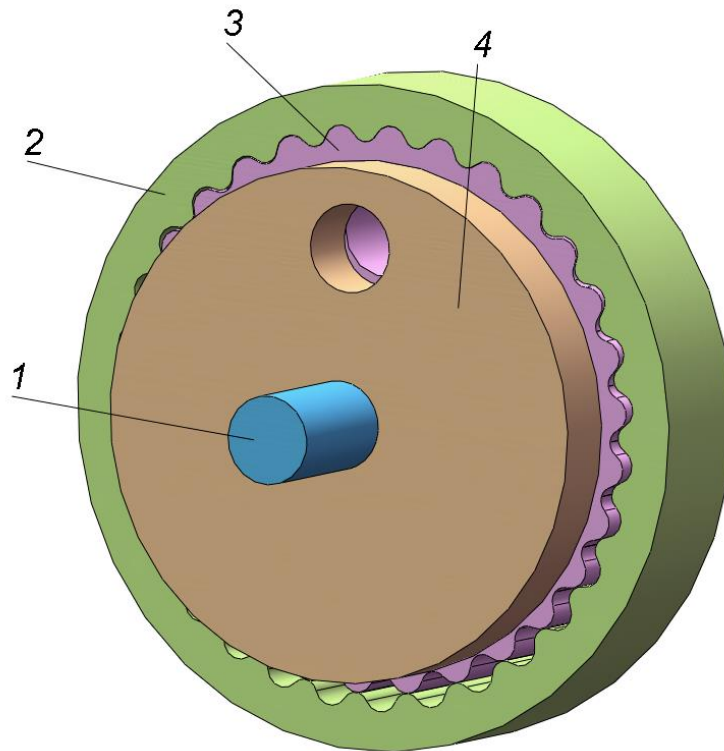


Рис. 29. Модель для проведения исследования. 1 – вал-эксцентрик; 2 – колесо; 3 – шестерня; 4 – корпус.

Полученные значения углов поворота необходимо принимать без округлений, так как в таких случаях может появиться ложная интерференция. Данные исследования внесены в таблицу 1.

Таблица 1 - Равномерность вращения

$\varphi_1$ , град	$\varphi_2$ , град	Интерференция, мм <sup>3</sup>
11.6129	0.37461	0
23.22581	0.74922	0
34.83871	1.123829	0
46.45161	1.498439	0
58.06452	1.873049	0
69.67742	2.247659	0
81.29032	2.622268	0
92.90323	2.996878	0
104.5161	3.371488	0
116.129	3.746098	0
127.7419	4.120708	0
139.3548	4.495317	0
150.9677	4.869927	0
162.5806	5.244537	0
174.1935	5.619147	0
185.8065	5.993757	0
197.4194	6.368366	0
209.0323	6.742976	0
220.6452	7.117586	0
232.2581	7.492196	0
243.871	7.866805	0
255.4839	8.241415	0
267.0968	8.616025	0
278.7097	8.990635	0
290.3226	9.365245	0
301.9355	9.739854	0
313.5484	10.11446	0
325.1613	10.48907	0
336.7742	10.86368	0
348.3871	11.23829	0
360	11.6129	0

На рис. 30 отображен график зависимости угла поворота эксцентрика от угла поворота колеса. По этому графику и данным таблицы 1 можно сделать вывод, что интерференция не возникает ни в одной паре зацепления, вращение происходит плавно и равномерно.



Рис. 30. Оценка плавности хода.

Дополнительно, в текущем исследовании можно показать движение шестерни. Это движение показано на рис. 31.

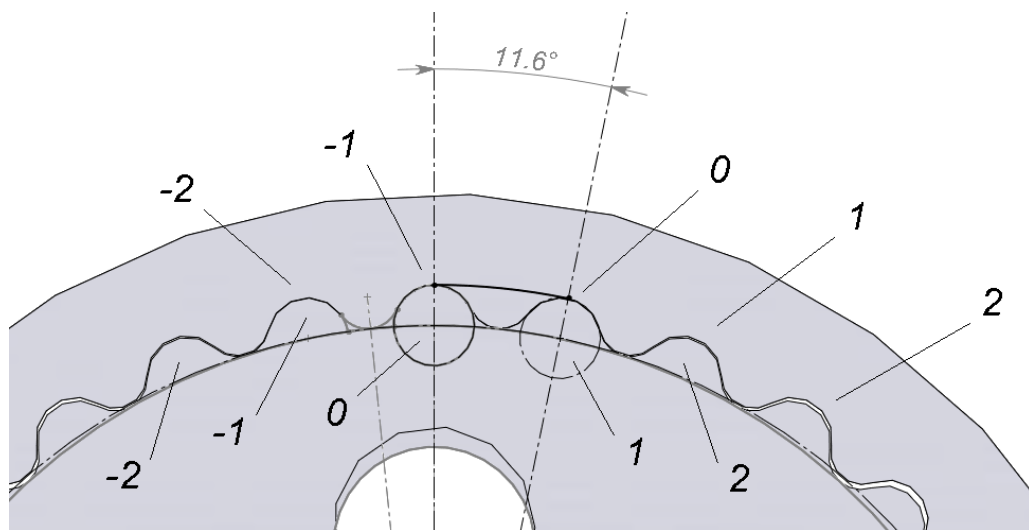


Рис. 31. Движение шестерни и колеса.

Получается, за полный оборот вала-эксцентрика шестерня завершила оборот и вернулась в исходное положение, колесо же повернулось на  $11,6^\circ$ . Тогда сейчас в зацеплении находится нулевой зуб шестерни и -1 впадина колеса.

## 2.6. Нагрузочная способность передачи

Предыдущее исследование показало, что без учета нагрузки предложенная передача работает равномерно. Следующее исследование заключается в проверке зацепления на воспринимаемую нагрузку.

Необходимо убедиться, как передается нагрузка с нулевой пары зубьев на первую. Для этого приложим нагружение через поворот колеса на некий угол для создания упругой деформации в зацеплении, деформацию будем фиксировать. Эту нагрузку для начала принимаем  $\Delta\varphi_k = -0,005^\circ$ .

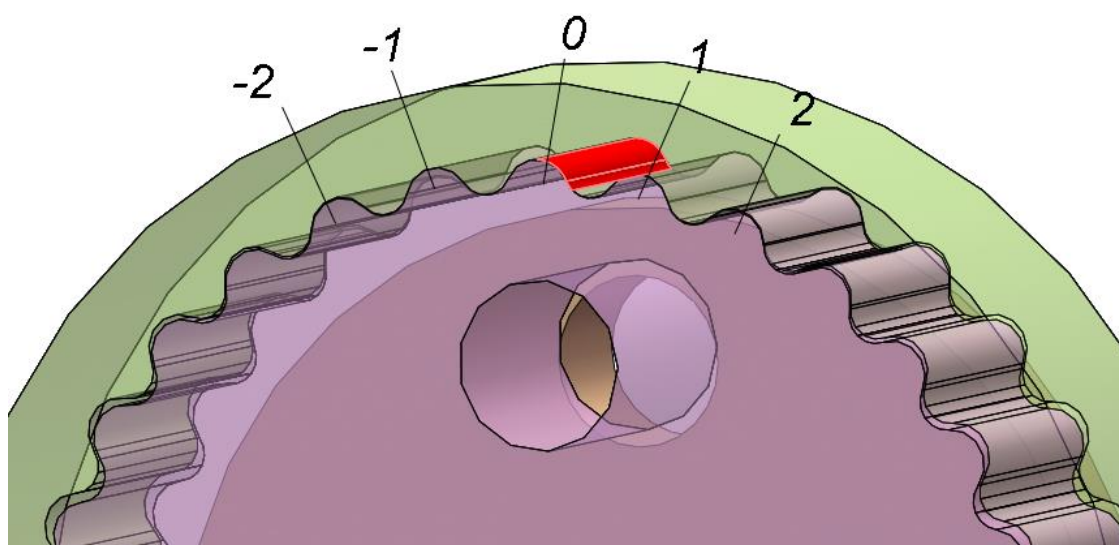


Рис. 32. Предварительное нагружение зацепления кинематического редуктора при  $\Delta\varphi_k = -0,005^\circ$

Из рис. 32 видно, что при таком повороте колеса на  $\Delta\varphi_k = -0,005^\circ$  нагружается только нулевые зубья.

Понаблюдаем, как будет происходить разгрузка нулевой зубчатой пары и нагрузка первой. Для этого будем поворачивать эксцентрик на  $\frac{\varphi_{\text{экс}}}{10}$ , а колесо на  $(\Delta\varphi_{\text{кол}} + \varphi_{\text{кол}})/10$ , отмечая интерференцию, появившуюся в зацеплении (рис. 25).

Таблица 2 - Интерференция при нагрузке в  $\Delta\varphi_k = -0,005^\circ$

№	Предварительное нагружение		Угол поворота эксцентрика $\varphi_1$ , град	Угол поворота колеса $\varphi_2$ , град	Интерференция, мм <sup>3</sup>		
	$\Delta\varphi_2$ , град	Интерференция, мм <sup>3</sup>			«0» пара	«1» пара	$\Sigma$
0	0	0	0	-0.005	0.06	0	0.06
1	-0.0005	0.01	1.161290323	0.036960978	0.04	0	0.04
2	-0.001	0.01	2.322580645	0.073921956	0.02	0	0.02
3	-0.0015	0.02	3.483870968	0.110882934	0.007	0	0.007
4	-0.002	0.02	4.64516129	0.147843913	0.0005	0	0.0005
5	-0.0025	0.03	5.806451613	0.184804891	0	0	0
6	-0.003	0.03	6.967741935	0.221765869	0	0.0005	0.0005
7	-0.0035	0.04	8.129032258	0.258726847	0	0.007	0.007
8	-0.004	0.05	9.290322581	0.295687825	0	0.02	0.02
9	-0.0045	0.05	10.4516129	0.332648803	0	0.04	0.04
10	-0.005	0.06	11.61290323	0.369609781	0	0.06	0.06

По данным таблицы 2 построим график, изображенный на рис. 33. По нему можно проследить, что нулевой зуб вышел из зацепления, а первый зашел.

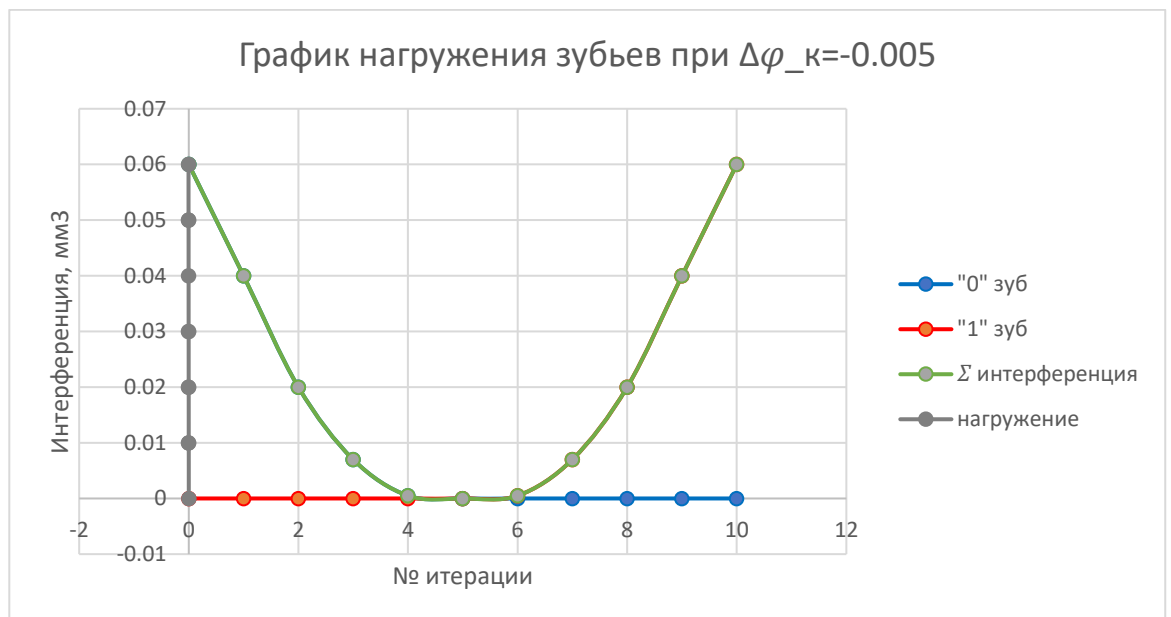


Рис. 33. График нагружения зубьев при  $\Delta\varphi_k = -0,005^\circ$ .

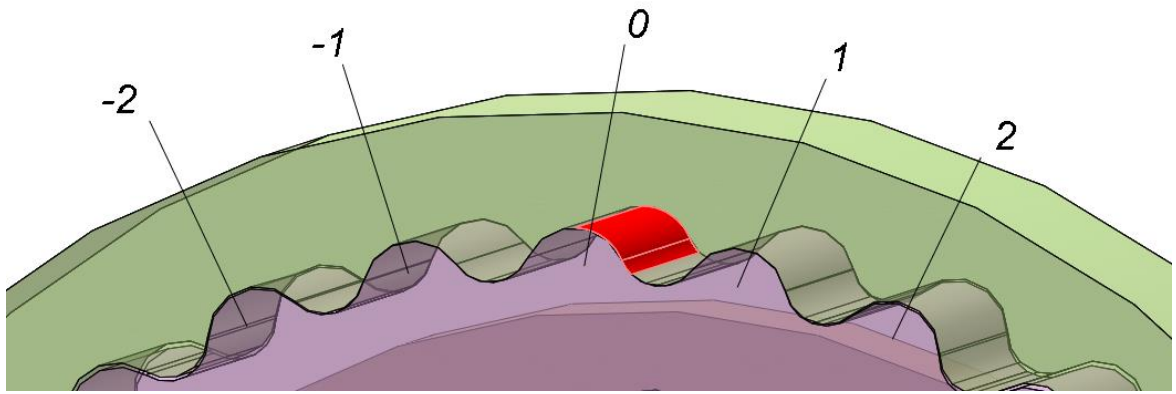


Рис. 34. Нагружена только нулевая пара.

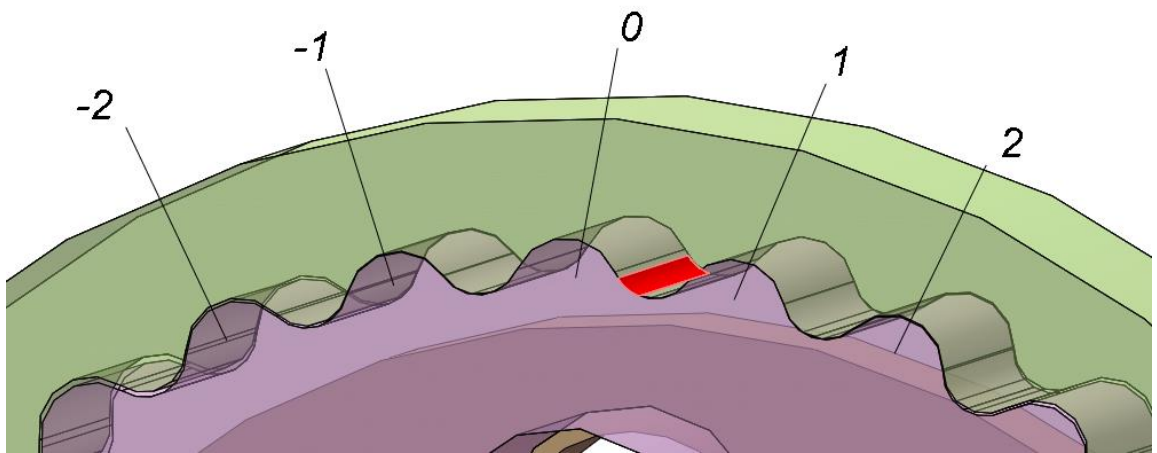


Рис. 35. Переходная нагрузка с нулевой пары на первую.

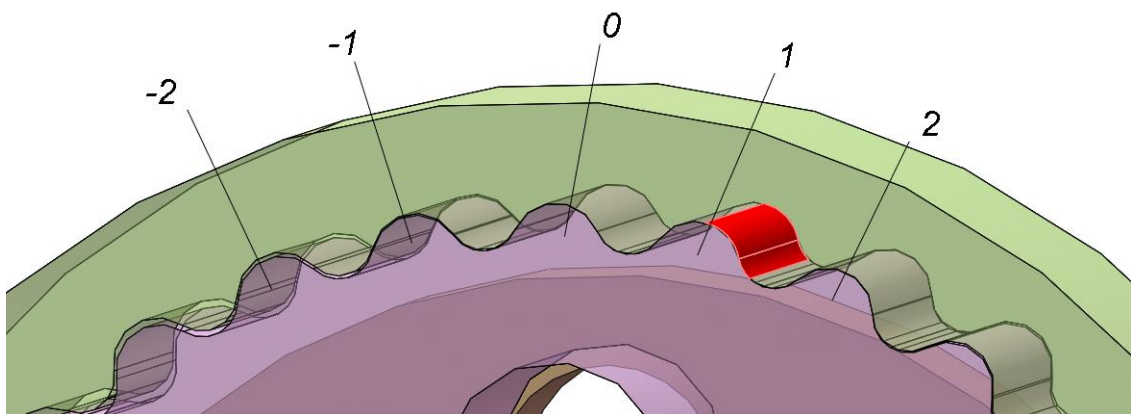


Рис. 36. Нагружена только первая пара.



Рассмотрев полученные данные, сделано заключение о том, что при выбранном угле  $\Delta\varphi_k = -0,005^\circ$  нулевая зубчатая пара вышла из зацепления на 5 доле поворота, но первая пара еще не успела войти в зацепление. Первая пара заходит в только на 6 доле поворота, отсюда, на пятой доле поворота передача не была нагружена.

Продублируем исследование, только при измененных параметрах. В качестве нагрузки берем  $\Delta\varphi_k = -0,01$ .

Таблица 3 - Интерференция при нагрузке в  $\Delta\varphi_k = -0,01^\circ$

№	Предварительное нагружение		Угол поворота эксцентрика $\varphi_1$ , град	Угол поворота колеса $\varphi_2$ , град	Интерференция, мм <sup>3</sup>		
	$\Delta\varphi_2$ , град	Интерференция, мм <sup>3</sup>			«0» пара	«1» пара	$\Sigma$
0	0	0	0	-0.01	0.14	0	0.14
1	-0.001	0.01	1.161290323	0.036460978	0.12	0	0.12
2	-0.002	0.02	2.322580645	0.072921956	0.06	0	0.06
3	-0.003	0.03	3.483870968	0.109382934	0.035	0	0.035
4	-0.004	0.05	4.64516129	0.145843913	0.025	0	0.025
5	-0.005	0.06	5.806451613	0.182304891	0.02	0	0.02
6	-0.006	0.08	6.967741935	0.218765869	0.01	0.01	0.02
7	-0.007	0.09	8.129032258	0.255226847	0	0.03	0.03
8	-0.008	0.11	9.290322581	0.291687825	0	0.06	0.06
9	-0.009	0.12	10.4516129	0.328148803	0	0.1	0.1
10	-0.01	0.14	11.61290323	0.364609781	0	0.13	0.13

По данным табл. 3 построим график, показанный на рис. 37.

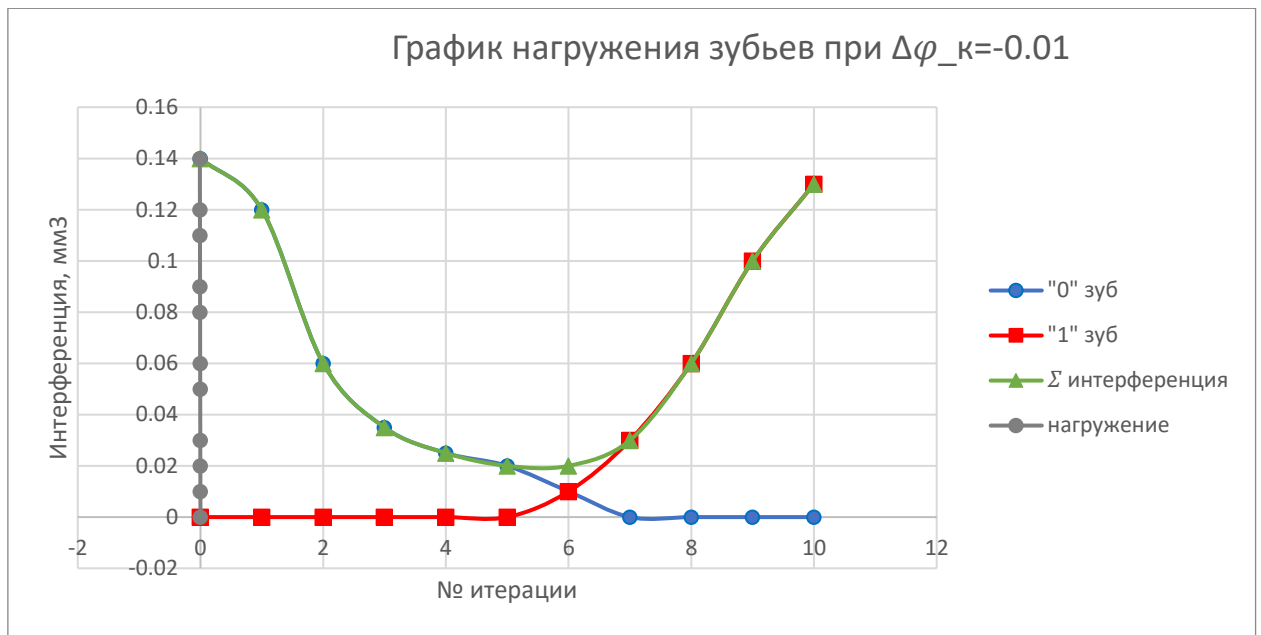


Рис. 37. График нагружения зубьев при  $\Delta\varphi_k = -0,01^\circ$ .

По графику рис. 37 и данным табл. 3 видно, что первая пара зубьев зашла в зацепление в тот момент, когда нулевая еще не вышла. Это значит, что нагружение первой пары совпадает по времени с разгрузкой нулевой пары.

Построим график при  $\Delta\varphi_k = -0,02^\circ$ . Данные показаны в табл. 4 и рис. 38.

Таблица 4 - Интерференция при нагрузке в  $\Delta\varphi_k = -0,02^\circ$

№	Предварительное нагружение		Угол поворота эксцентрика $\varphi_1$ , град	Угол поворота колеса $\varphi_2$ , град	Интерференция, мм <sup>3</sup>		
	$\Delta\varphi_2$ , град	Интерференция, мм <sup>3</sup>			«0» пара	«1» пара	$\Sigma$
0	0	0	0	-0.02	0.29	0	0.29
1	-0.002	0.02	1.16129	0.035461	0.26	0	0.26
2	-0.004	0.05	2.322581	0.070922	0.2	0	0.2
3	-0.006	0.08	3.483871	0.106383	0.12	0.0001	0.1201
4	-0.008	0.11	4.645161	0.141844	0.08	0.0002	0.0802
5	-0.01	0.14	5.806452	0.177305	0.07	0.02	0.09
6	-0.012	0.17	6.967742	0.212766	0.06	0.06	0.12

7	-0.014	0.2	8.129032	0.248227	0.03	0.12	0.15
8	-0.016	0.23	9.290323	0.283688	0.01	0.2	0.21
9	-0.018	0.26	10.45161	0.319149	0.01	0.26	0.27
10	-0.02	0.29	11.6129	0.35461	0.00029	0.29	0.29029

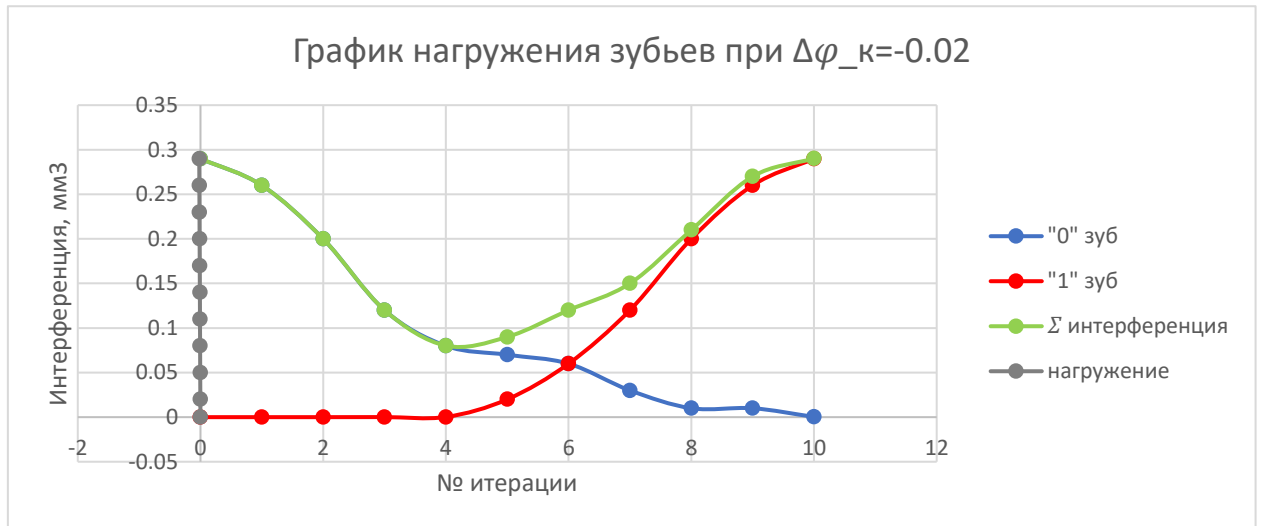


Рис. 38. Нагружение первой пары зубьев при  $\Delta\varphi_k = -0,02^\circ$ .

По табл. 4 и рис. 38 видно, что движение передачи не поменялось, увеличилась лишь только величина интерференции.

В этом исследовании необходимо, чтобы нагрузка действовала равномерно, без резких перепадов и импульсов. Это будет обеспечено такой нагрузкой, под которой в зацеплении будет участвовать некоторое количество зубчатых пар. Рассмотрим случай с нагрузкой  $\Delta\varphi_k = -0,05^\circ$ . Полученные данные занесены в таблицу 5 и отображены на рисунке 39.

Таблица 5 – Интерференция при нагрузке в  $\Delta\varphi_k = -0,05^\circ$ .

№	Предварительное нагружение		Угол поворота эксцентрика $\varphi_1$ , град	Угол поворота колеса $\varphi_2$ , град	Интерференция, мм <sup>3</sup>				
	$\Delta\varphi_2$ , град	Инт-ция, мм <sup>3</sup>			«-1» пара	«0» пара	«1» пара	«2» пара	$\Sigma$
0	0	0	0	-0.05	0.27	0.78	0.2	0.00025	1.25025
1	-0.005	0.06	1.16129	0.032461	0.03	0.7	0.01	0	0.74
2	-0.01	0.14	2.322581	0.064922	0.02	0.5	0.06	0	0.58
3	-0.015	0.21	3.483871	0.097383	0.0001	0.42	0.1	0	0.5201
4	-0.02	0.29	4.645161	0.129844	0	0.38	0.16	0	0.54
5	-0.025	0.37	5.806452	0.162305	0	0.36	0.25	0	0.61
6	-0.03	0.46	6.967742	0.194766	0	0.34	0.32	0.0004	0.6604
7	-0.035	0.54	8.129032	0.227227	0	0.3	0.37	0.01	0.68
8	-0.04	0.62	9.290323	0.259688	0	0.28	0.5	0.04	0.82
9	-0.045	0.7	10.45161	0.292149	0	0.27	0.64	0.11	1.02
10	-0.05	0.78	11.6129	0.32461	0	0.26	0.84	0.23	1.33

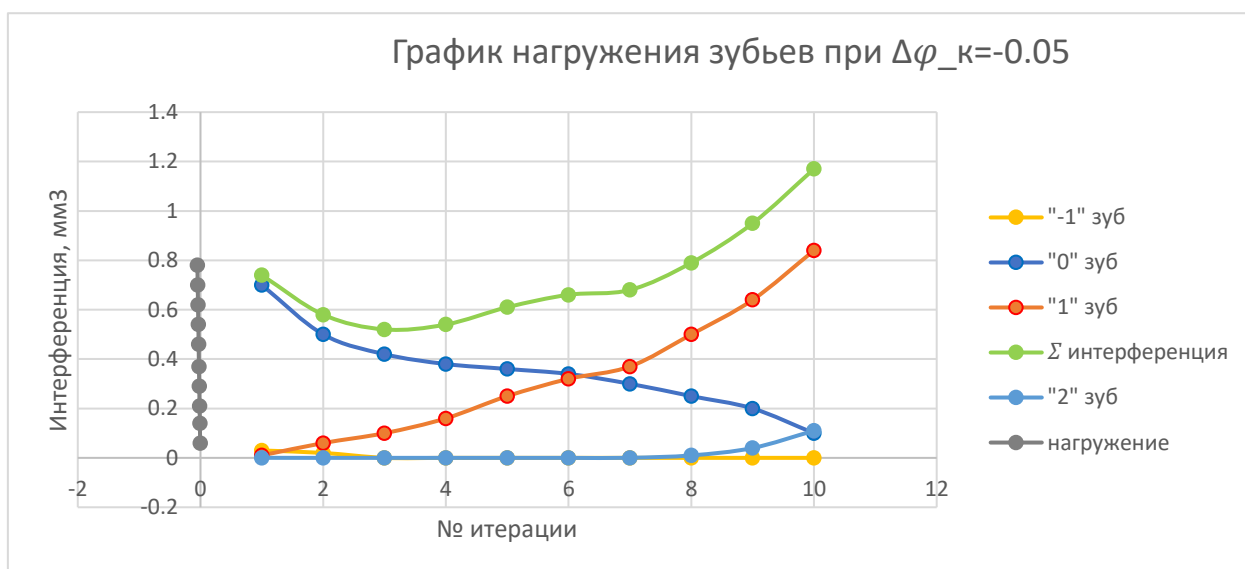


Рис. 39. Нагружение зубьев при  $\Delta\varphi_k = -0,05^\circ$ .

По полученным данным можно сделать вывод, что нагрузку воспринимает сразу 4 зуба. Передача работает равномерно, без пауз, каждая доля поворота несет определенный кинематический смысл.

Увеличение предварительной нагрузки за счет угла  $\Delta\varphi_k$  расширяет количество зубчатых пар, принимающих участие в работе, обеспечивая плавность работы волнового кинематического редуктора.

## 2.7. Нормальное распределение

Для понимания распределения нагрузки на зубья шестерни необходимо провести исследование на распределение Пуассона. В ходе его шестерня неподвижно зафиксирована, а колесо проворачивается в сторону, противоположную его положительному вращению. Интерференцию, возникающую на зубьях, фиксируем, так как она будет обозначать контактные напряжения.

Таблица 6 – Данные для построения графика распределения «Пуассона»

№ зуба	Нагрузка, градусы						
	0,01	0,03	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
-2	0	0	0	0	0	0	0,0001
-1	0	0,00016	0,27	0,4	0,54	0,68	0,83
0	0,14	0,29	0,78	0,95	1,11	1,27	1,4
1	0	0,01	0,2	0,31	0,42	0,55	0,67
2	0	0	0,00025	0,01	0,03	0,07	0,11

По таблице и рис. видно, что наибольшая интерференция (контактные напряжения) наблюдаются на нулевом зубе. Остальные нагрузки распределяются симметрично относительно нулевого зуба.

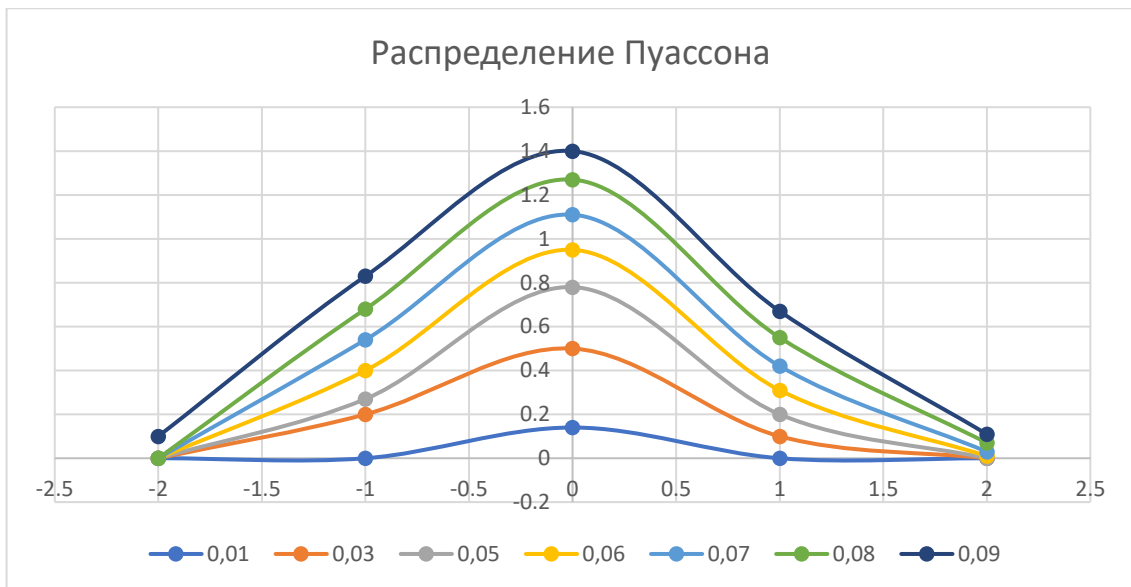


Рис. 40. График распределения «Пуассона».

Так же видно, что при увеличении нагрузки распределение имеет асимметрию и неравномерно распределяется между пятью зубьями: «-2», «-1», «0», «1», «2».

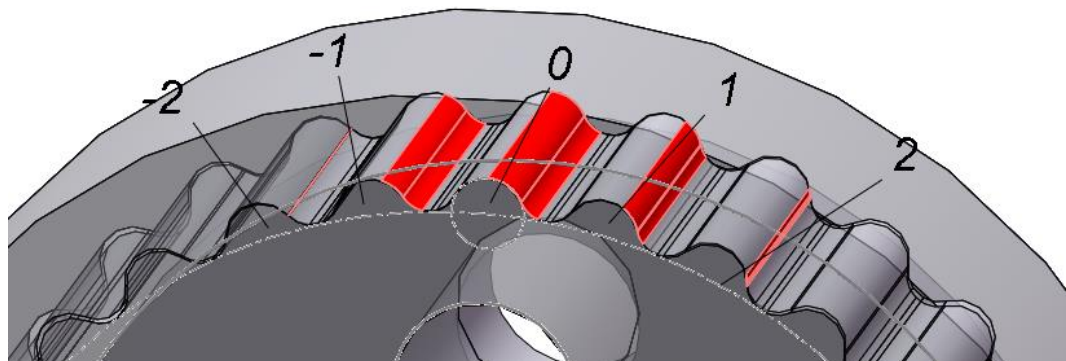


Рис. 41. Распределение нагрузки при  $0,09^\circ$

## 2.8. Несущая способность зуба

В следующем исследовании необходимо понять, какую нагрузку передача сможет воспринимать нормально, без разрушений и срезов.

В предыдущем исследовании мы выяснили, что максимальная интерференция возникает на нулевом зубе. Следовательно, данный анализ будет применяться к нулевому зубу, так как на него воздействует наибольшая нагрузка.

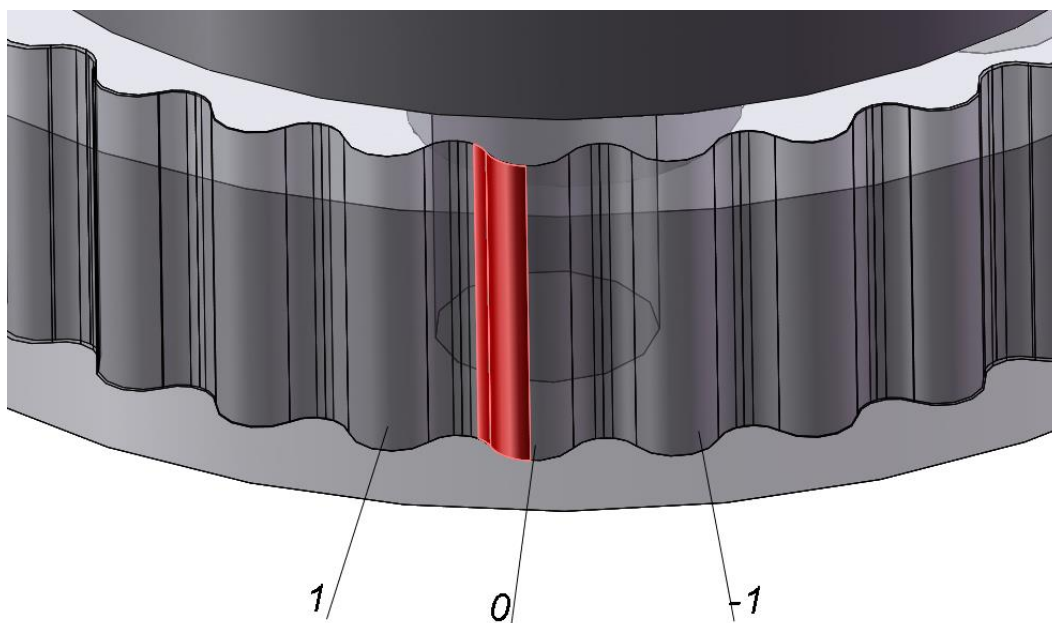


Рис. 42. Нагрузка только на нулевом зубе

При контактной нагрузке в поверхностном слое зубьев кинематической пары появляются контактные напряжения. Объем интерференции – в нашем случае – это и есть контактные напряжения, возникающие в поверхностных слоях зубьев. Эти напряжения видны на рисунке 42. (отмечены красным)

С помощью полученной интерференции можно определить величину удельной деформации зуба. Зная величину удельной деформации зуба, можно определить усилия, необходимые для этой деформации. Но при этом необходимо учитывать предел допускаемых напряжений, чтобы предотвратить необратимые деформации (срез, смятие) зуба.

Величину относительной деформации можно определить по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta W}{2W_0} \quad (5)$$

Объем деформации определим из эксперимента. Для вычисления напряжений существует два пути: если известны внешние силы, то вычисляется по формуле:

$$\sigma = \frac{P}{F}; \quad (6)$$

Если же внешние силы неизвестны, но известна удельная деформация, то напряжение определяется формулой:

$$\sigma = \varepsilon * E \quad (7)$$

где  $E$  – модуль Юнга.

В своей работе Степанова Д.Л. провела доказательный эксперимент, выводом которого является то, как воспринимается нагрузка на зубе шестерни (рис. 43)

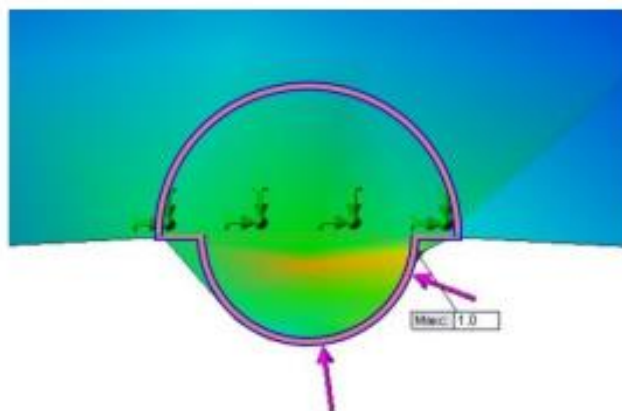


Рис. 43. Зона восприятия нагрузки на зуб шестерни [10]

Как следствие, такая же нагрузка воздействует на впадину колеса.

Значения характерного объема будет получаться из суммы двух площадей: площадь зуба и площадь зон колеса, воспринимающей нагрузку, и умноженного на ширину венца колеса:

$$W_0 = \pi \cdot r^2 \cdot B = 3.14 \cdot 2^2 \cdot 15 = 188.4 \text{ мм}^3 \quad (8)$$

Таблица 7 – Изменение контактных деформаций

	Нагрузка, градусы								
	0,001	0,003	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01	0,02
$\Delta W, \text{мм}^3$	0,01	0,03	0,06	0,08	0,09	0,11	0,12	0,14	0,29
$W_0, \text{мм}^3$	188.4								
$E, \text{МПа}$	214000								
$\sigma_T, \text{МПа}$	350								
$\varepsilon_{\text{расчет}}$	0.000053	0.000159	0.000318	0.000424	0.000477	0.000583	0.000636	0.000743	0.001539
$\varepsilon_{\text{таблич}}$	0.0016355								



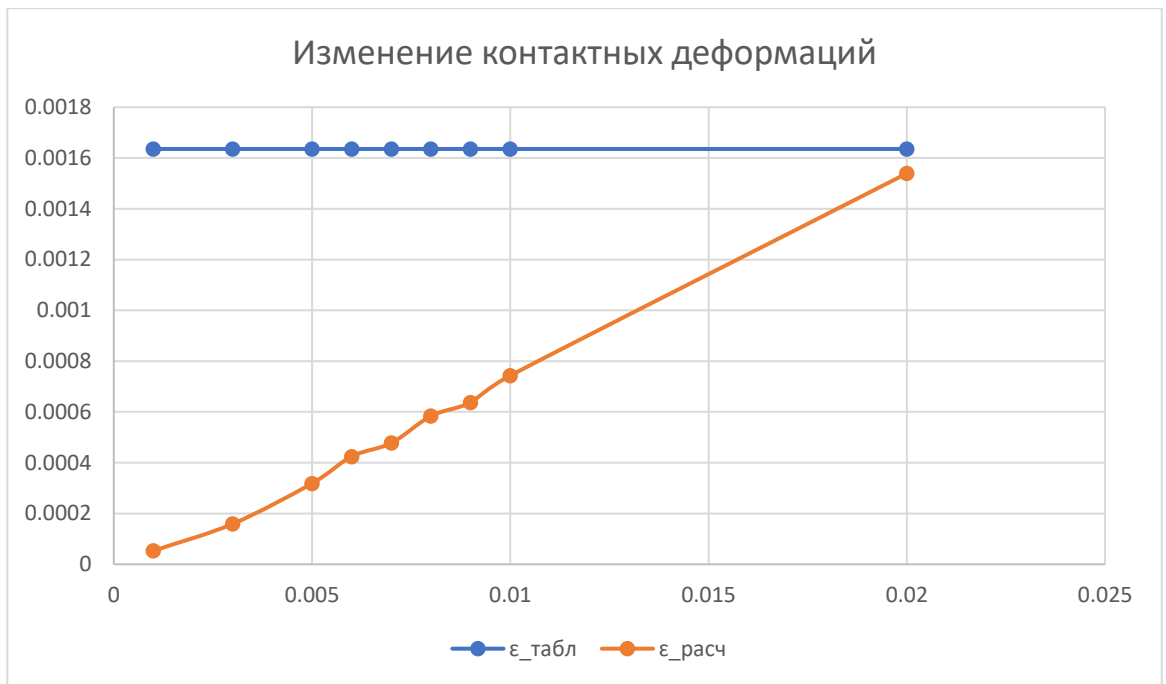


Рис. 44. Зависимость контактных деформаций от нагрузки.

По полученным данным можно сделать вывод, что при нагрузке в  $0,02^\circ$  расчетное значение близко к табличному. Следовательно проектируемый волновой кинематический редуктор может воспринимать такую нагрузку без разрушений (срез, смятие) зуба.

## 2.9. Прочностной расчет зуба

Передача нагрузки происходит в результате контакта профилей зубьев шестерни и колеса. Под действием давления зубчатые пары находятся в сложнапряженном состоянии. При этом нагружается и поверхность зубьев, и весь объем зуба. Поэтому работоспособность передачи оценивается контактной прочностью боковой поверхности зубьев и объемной прочностью зуба при сложном нагружении.

При недостаточной контактной прочности поверхности зубьев происходит усталостное выкрашивание поверхностей контакта.

Проверку зубьев шестерни на контактную прочность рассмотрим при помощи формулы:

$$\sigma_H = \left( \frac{1}{d_w} \right) \sqrt{\frac{10^3 \cdot T_1 \cdot K_\beta \cdot K_v \cdot K_b \cdot (u + 1)}{K_p \cdot \mu \cdot t \cdot u}}, \quad (9)$$

где  $K_\beta$  - коэффициент, учитывающий особенности контактирования зубьев в передачи Новикова;

$K_p$  - коэффициент исходной рейки, характеризующий контур зацепления и значение приведенного модуля упругости материалов зубчатых колес;

$\mu$  - величина, представляющая целую часть коэффициента осевого перекрытия;

$d_w$  - делительный диаметр.

Значения оставшихся величин берем из справочника как для эвольвентного зацепления [12].

$$K_\beta = 0,25; K_v \cdot K_b = 1,2; K_p = 2 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{МПа}}; \mu = 2$$

Передаточное число:

$$u = \frac{z_2}{z_1} = \frac{31}{30} = 1.03 \quad (10)$$

Модуль зацепления:  $t = r = 2$  мм

Проверяем по условию:

$$\begin{aligned} \sigma_H &= \left( \frac{1}{d_w} \right) \sqrt{\frac{10^3 \cdot T_1 \cdot K_\beta \cdot K_v \cdot K_b \cdot (u + 1)}{K_p \cdot \mu \cdot t \cdot u}} = \\ \sigma_H &= \left( \frac{1}{60} \right) \sqrt{\frac{10^3 \cdot 1,5 \cdot 0,25 \cdot 1,2 \cdot (1,03 + 1)}{2 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1,03}} = 55 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\sigma_H \ll [\sigma_H] \quad (12)$$

$$55 \text{ МПа} \ll 660 \text{ МПа} \quad (13)$$

Расчет показывает, что конфигурация зуба и выбранный материал, указанные в проекте, обеспечивают запас прочности.

## 2.10. Путь трения

Трение существует в любых парах зубчатых зацеплений. Трение приводит к изнашиванию зубьев и изменению их профилей. Рассмотрим трение скольжения зубьев волнового кинематического редуктора.

Для понимания трения скольжения в заданном редукторе, необходимо поворачивать эксцентрик на  $\frac{\varphi_{\text{экс}}}{10}$ , а колесо на  $\frac{\varphi_{\text{к}}}{10}$ . При поворотах эксцентрика и колеса мы будем отслеживать изменение расстояния между центрами зуба шестерни и впадины колеса. Это расстояние и будем использовать для оценки пути трения скольжения.

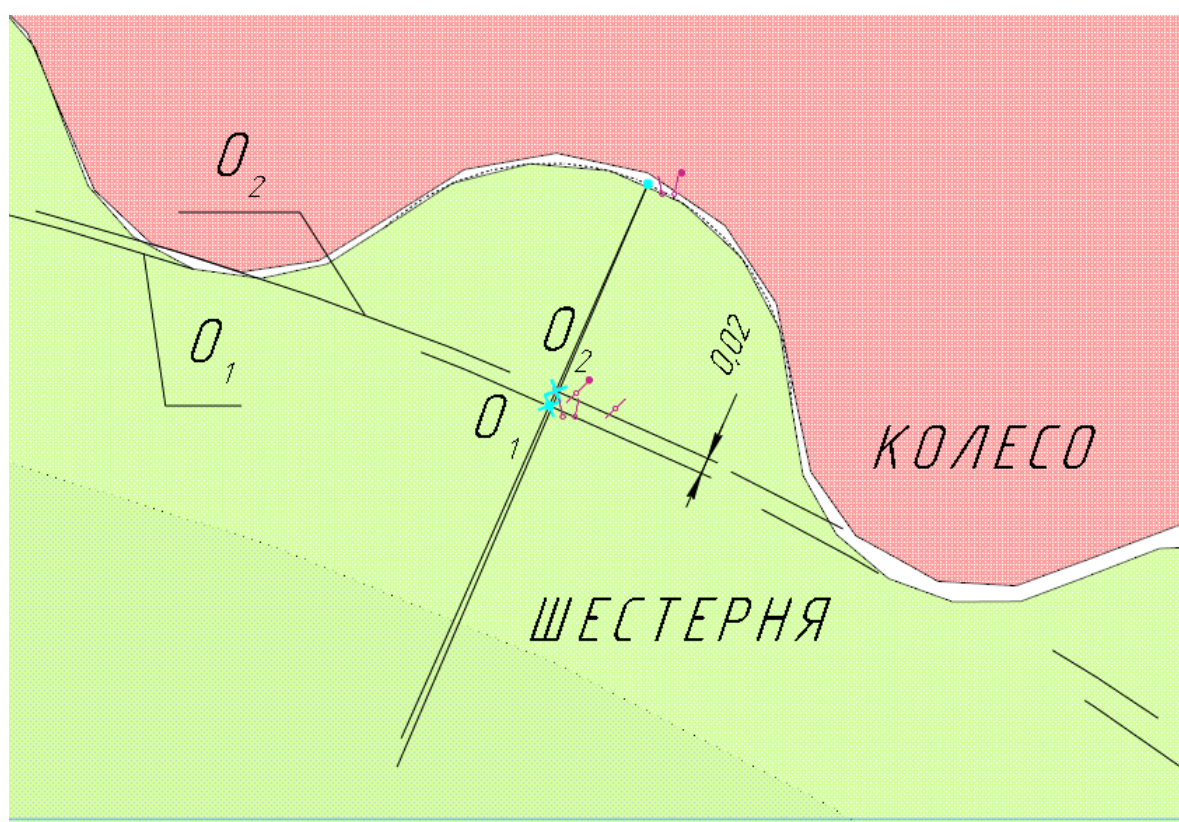


Рис. 45. Оценка пути трения скольжения.

На рисунке показаны:

$O_1$  – центр зуба шестерни;

$O_2$  – центр зуба колеса;

$D_1$  – делительный диаметр шестерни;

$D_2$  – делительный диаметр колеса.

На рис. показан отрезок, при помощи которого мы и будем оценивать путь трения. Этот отрезок  $O_1O_2$  отображает то расстояние, на которое проскальзывает 1 зуб при полном обороте эксцентрика.

Необходимо определить, как меняется эта длина при повороте угла эксцентрика  $\frac{\varphi_{\text{экс}}}{10}$  и колеса  $\frac{\varphi_{\text{к}}}{10}$ , и на  $\Delta\varphi_{\text{к}} + \varphi_{\text{к}}$ .

Таблица 8 - Данные для оценки пути трения скольжения

№	$\varphi_{\text{экс}}$ , град	$\varphi_{\text{к}}$ , град	$O_1O_2$ , «0» пара	$O_1O_2$ , «1» пара	$\varphi_{\text{к}} + \Delta\varphi$ , град	$O_1O_2$ , «0» пара	$O_1O_2$ , «1» пара
0	0	0	0	0.02	-0.01	0.005	0.02
1	1.161290	0.037460	0.0004	0.017	0.027460	0.005	0.018
2	2.322580	0.074921	0.00075	0.013	0.064921	0.005329	0.015
3	3.483870	0.112382	0.001787	0.010699	0.102382	0.005763	0.012
4	4.645161	0.149843	0.003098	0.007947	0.139843	0.006499	0.009938
5	5.806451	0.187304	0.0049	0.005683	0.177304	0.007283	0.007904
6	6.967741	0.224765	0.007047	0.003744	0.214765	0.008836	0.006818
7	8.129032	0.262226	0.009758	0.002214	0.252226	0.011001	0.005984
8	9.290322	0.299687	0.012702	0.001128	0.289687	0.013521	0.005896
9	10.45161	0.337148	0.016075	0.000350	0.327148	0.016603	0.005520
10	11.61290	0.374609	0.019751	0.000107	0.364609	0.020228	0.005482

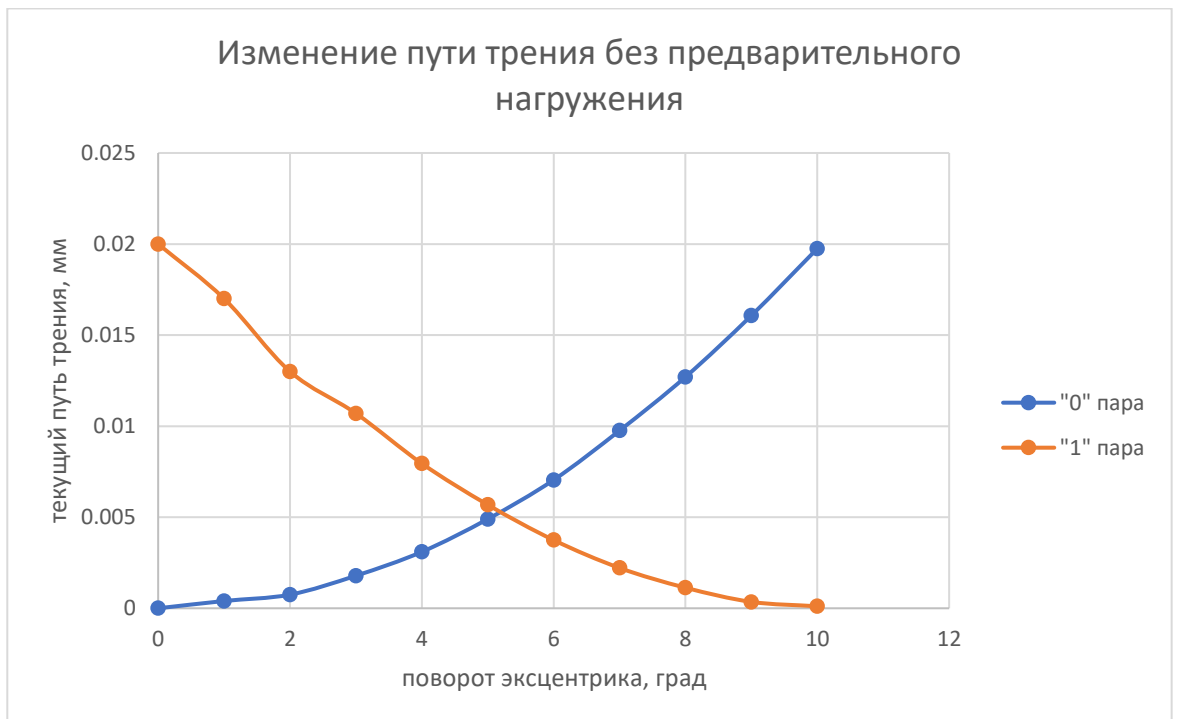


Рис. 46. Изменение пути трения за полный оборот вала-эксцентрика без предварительной нагрузки

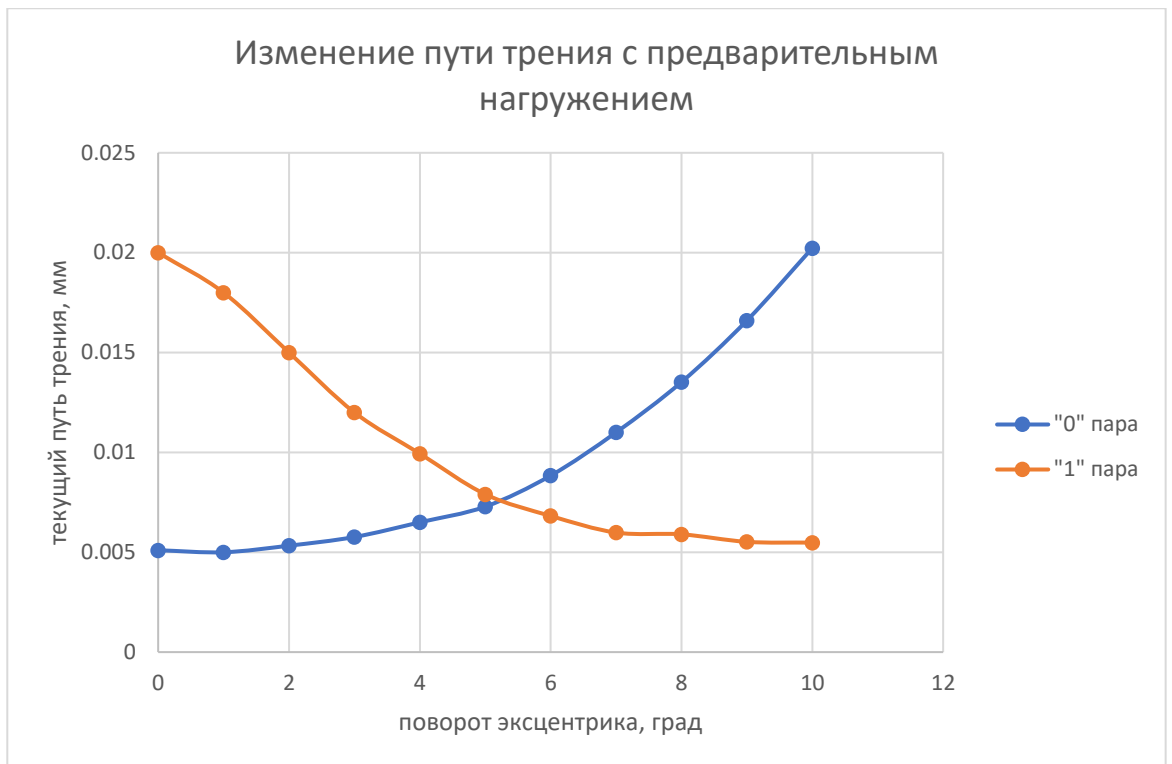


Рис. 47. Изменение пути трения за полный оборот вала-эксцентрика с учетом предварительной нагрузки

По рисункам и данным таблицы можно сказать, что путь трения одного зуба по величине является очень маленьким, имеет плавную тенденцию к изменению. Так как графики очень схожи по числовым и внешним характеристикам, можно сделать вывод, что зуб работает устойчиво.

Чтобы найти суммарный путь трения, необходимо воспользоваться формулой:

$$\sum \text{путь скольжения} = O_1 O_2 \cdot z_1 = 0,019 \cdot 30 = 0,6 \text{ мм} \quad (14)$$

Просчитав общий путь скольжения, получаем, что он равен 0,6 мм, что близко к значению эксцентриситета входного вала (1 мм). Тогда можно сделать вывод, что потерями при работе волнового кинематического редуктора, предложенного в данном проекте, можно пренебречь, так как они малы.

## 2.11. Качение зубьев

Помимо трения скольжение, существует трение качения зубьев. Основную часть рабочего времени зубчатые пары обкатываются.

Для оценки качения зубьев необходимо фиксировать значение угла между осями зубьев колеса и шестерни при повороте эксцентрика на угол  $\frac{\varphi_{\text{экс}}}{10}$ , а колеса на  $\frac{\varphi_{\text{к}}}{10}$  без предварительной нагрузки, и  $\Delta\varphi_{\text{к}} + \varphi_{\text{к}}$  с ней. Данные, полученные в ходе эксперимента, занесем в таблицу 9.

Таблица 9 - Данные для оценки качества зубьев

№	$\varphi_{\text{экс}}$ , град	$\varphi_{\text{к}}$ , град	$\alpha_1$ , «0» пара	$\alpha_2$ , «1» пара	$\varphi_{\text{к}} + \Delta\varphi$ , град	$\alpha_1$ , «0» пара	$\alpha_2$ , «1» пара
0	0	0	0	0.387	-0.01	-0.01	0.42
1	1.16129	0.037461	0.037461	0.3483	0.027461	0.027461	0.36
2	2.322581	0.074922	0.074922	0.3096	0.064922	0.064922	0.315
3	3.483871	0.112383	0.112383	0.2709	0.102383	0.102383	0.28
4	4.645161	0.149844	0.149844	0.2322	0.139844	0.139844	0.245
5	5.806452	0.187305	0.187305	0.1935	0.177305	0.177305	0.21
6	6.967742	0.224766	0.224766	0.1548	0.214766	0.214766	0.175
7	8.129032	0.262227	0.262227	0.1161	0.252227	0.252227	0.14
8	9.290323	0.299688	0.299688	0.0774	0.289688	0.289688	0.105
9	10.45161	0.337149	0.337149	0.0387	0.327149	0.327149	0.07
10	11.6129	0.37461	0.37461	0.01	0.36461	0.36461	0.01

По этим данным получим графики, показанные на рис. 48 и 49.

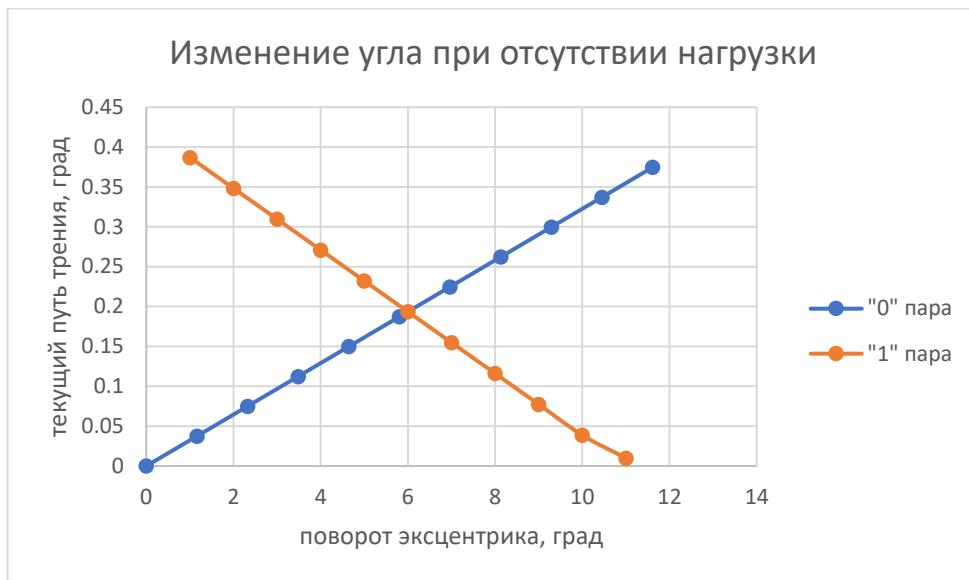


Рис. 48. График изменения углов между осями зуба колеса и шестерни для нулевой и первой пары при повороте эксцентрика без предварительной нагрузки

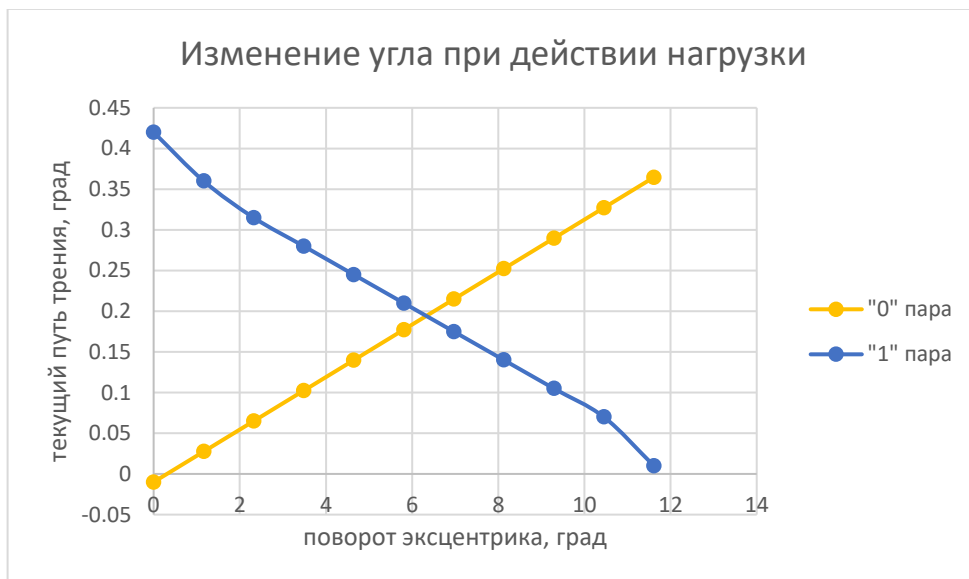


Рис. 49. График изменения углов между осями зуба колеса и шестерни для нулевой и первой пары при повороте эксцентрика без предварительной нагрузки

Из данных таблицы 9 и графиков рис. 48, рис. 49 следует, что качение, так же, как и скольжение, происходит плавно, на всех графиках нет резких скачков. Можно сказать, что зубчатая пара работает плавно и устойчиво.

## 2.12. Рабочая зона механизма

ГОСТ 25686-85 определяет понятие рабочая зона как пространство, в котором может находиться рабочий орган при функционировании манипулятора. За главное ограничение рабочей зоны принимается данная характеристика – повороты звеньев механизма не должны приводить к пересечению других элементов конструкции.

Для определения рабочей зоны механизма, будем пользоваться конструктивной 3-D моделью в программном обеспечении SolidWorks.

Каждое звено устройства перемещается в своей плоскости, соответственно, выходное звено – сам стол, имеет достаточно большую рабочую зону.

Высота устройства при параллельности его стола и стола станка равна 237 мм от стола станка.

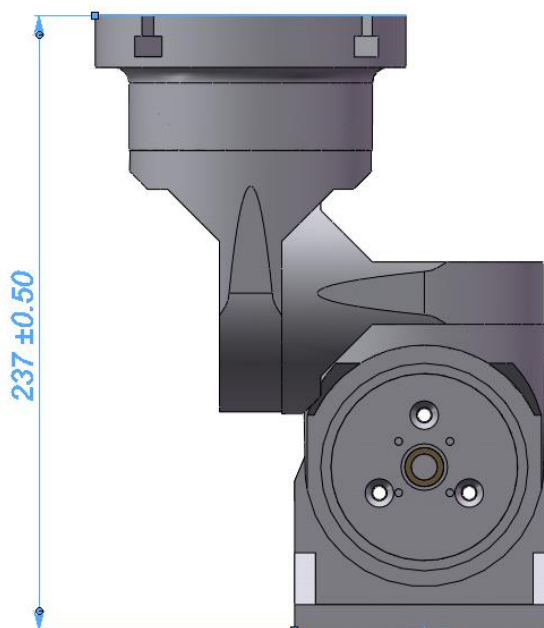


Рис. 50. Высота устройства при параллельном расположении плоскости стола устройства и стола станка.

Диаметральным размером, т.е. размером в плоскости X-Y, рабочей области является 254 мм, считая его от главной оси устройства.



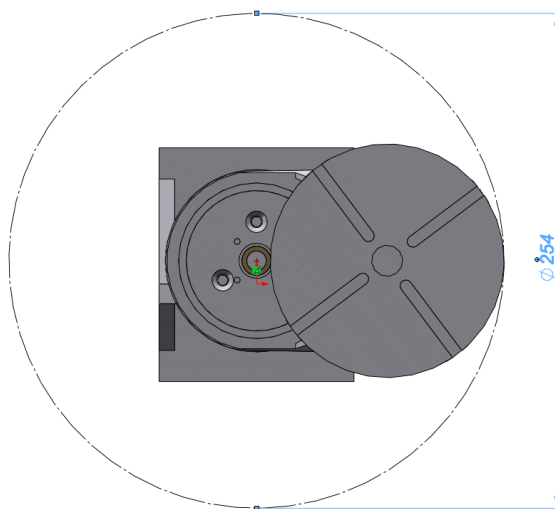


Рис. 51. Размер рабочей области, вид сверху.

Первое звено имеет ограничения в силу касания других звеньев. Область поворота ограничена углом в  $43.26^\circ$  от оси устройства.

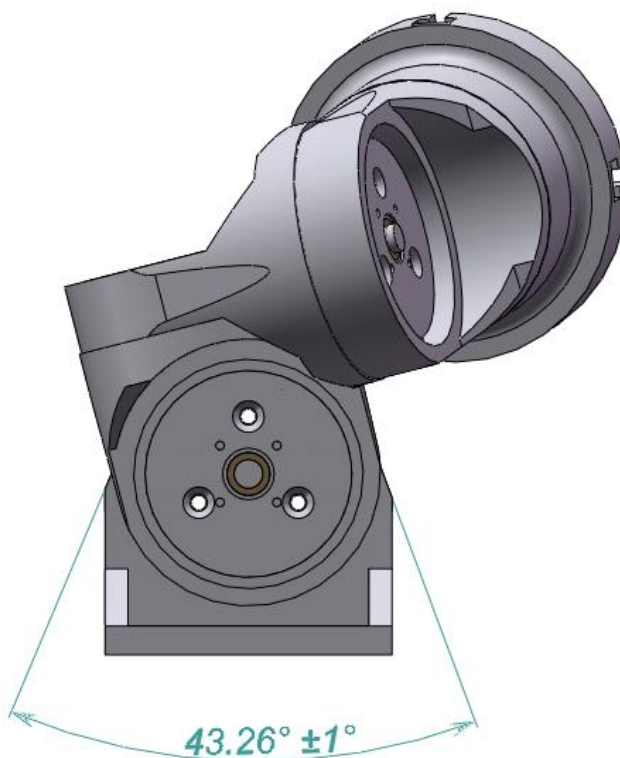


Рис. 52. Ограничение угла поворота первого звена.

Второе звено не имеет собственных ограничений во вращении. Его рабочая зона зависит только рабочей зоны от первого звена.

Третье звено имеет ограничение в  $180^\circ$  в силу конструктивных особенностей поворотного стола.

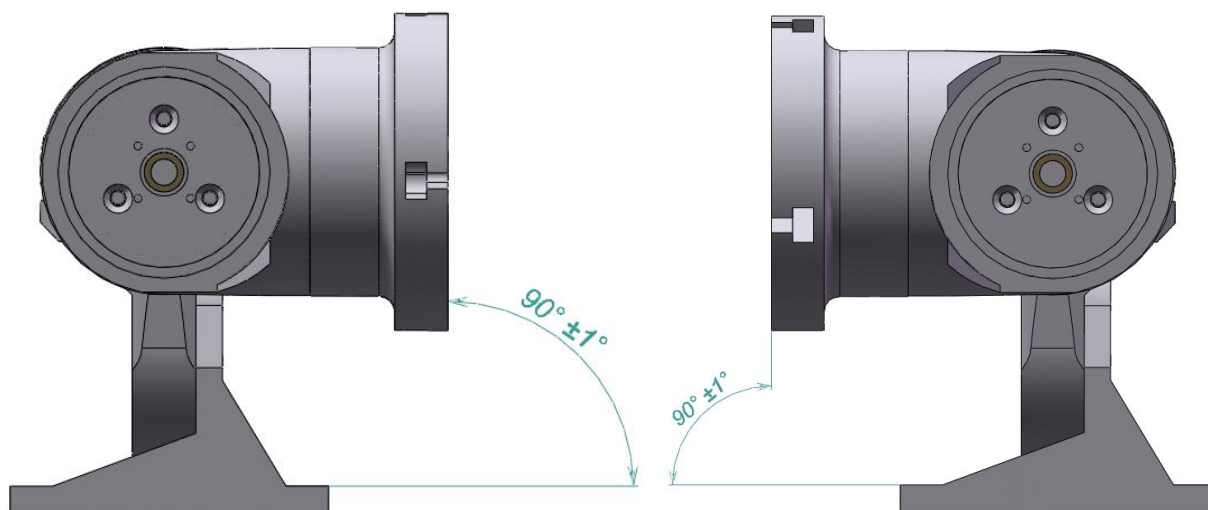


Рис. 53. Максимальные и минимальные положения третьего звена.

И выходное, четвертое звено, коим является стол, не имеет ограничений в своей плоскости вращения.

Таким образом, рабочая зона 4х степенного управляемого координатного стола ограничивается цилиндрической рабочей зоной диаметром 254 мм и высотой 237. Выбор рабочей зоны такой формы логичен в ходе использования пространства.

### **3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

#### **Введение**

Основной задачей данного раздела является оценка перспективности разработки и планирования финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, предлагаемого в рамках научно-исследовательского проекта. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на такие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, какой бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

В связи с тем, что экономика является неотъемлемой, постоянной и динамически развивающейся частью жизни, возникает необходимость непрерывно проводить исследование и мониторинг рынка. Поиск конкурирующих проектов позволяет определить необходимость и значимость новых разработок, а также их эффективность в случае успешной реализации конечного продукта.

Данный раздел предусматривает рассмотрение следующих задач:

- оценить перспективность проведения работ и коммерческий потенциал исследования;
- провести расчет трудоемкости выполнения работы;
- составить план комплекса работы;
- рассчитать затраты на проектирование, заработную плату и прочие расходы;
- определить возможные альтернативы проведения научных разработок.

В данной работе представлено проектирование и исследование координатного стола с волновым редуктором для станков с ЧПУ. Такое устройство служит для увеличения технологических возможностей станка.

### 3.1. Предпроектный анализ

#### 3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование. Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар или услуга.

Потенциальными потребителями подобных установок являются промышленные производства. Карта сегментирования рынка по области применения и доли рынка сбыта продукции приведена на таблице 10.

Таблица 10 – Карта сегментирования рынка

<b>Область рынка сбыта</b>	<b>Доля рынка, %</b>
Машиностроительная промышленность	30
Аэрокосмическая промышленность	25
Оборонная промышленность	30
Автомобильная промышленность	5
Нефтегазовая промышленность	10

В следствии приведенной карты сегментирования, можно выявить основную область применения данной разработки – машиностроительную

промышленность, однако, там присутствует одна из самых высоких конкуренций.

### 3.1.2 Анализ конкурентных технических решений

В настоящее время можно выделить несколько фирм, специализирующихся на поворотных управляемых столах для станков с ЧПУ.

В качестве первого аналога возьмем DETRON DTF-650H – наклонно поворотный стол с ЧПУ. Detron – тайваньский производитель, специализирующийся на проектировании и выпуске поворотных столов с ЧПУ, которые отличаются высоким качеством и экономичностью. В компании работают ведущие инженеры из Тайваня и Японии, которые специализируются на новейших технологиях, реализуемых в выпускаемых поворотных столах Detron.

В качестве второго и третьего аналога Haas HRT160 – вертикальный поворотный стол. Haas Automation является крупнейшей в Америке станкостроительной компанией, выпускающей всю номенклатуру вертикальных и горизонтальных обрабатывающих центров с ЧПУ, токарных станков с ЧПУ, поворотных устройств. Станки и поворотные устройства Haas полностью соответствуют установленным требованиям в отношении высокой степени точности, воспроизводимости и долговечности.

Таблица 11 - Оценочная карта для сравнения конкурентных решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентно-способность		
		Б <sub>с</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>с</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Повышение производительности	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4

2. Удобство в эксплуатации	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
3. Эргономичность	0,1	5	5	4	0,5	0,5	0,4
4. Надежность	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
5. Бесшумность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
6. Компактность	0,1	5	5	3	0,5	0,5	0,3
7. Простота эксплуатации	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
2. Цена	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,4
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
Итого:	1,0				5,5	4,1	3,8

Б1 (К1) – баллы (конкурентоспособность) проектируемого стола, Б2 (К2) и Б3 (К3) – баллы (конкурентоспособность) столов компаний Haas и Detron.

По оценочной карте из таблицы 1 видно, что новое устройство является конкурентоспособным, так как по многим параметрам превосходит своих конкурентов. Главными достоинствами данного управляемого стола являются: повышение производительности, компактность, надежность, простота эксплуатации.

### 3.1.3 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.

Таблица 12 – Матрица SWOT

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>C1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>C2. Компактность.</p> <p>C3. Бесшумность.</p> <p>C4. Надежность, способность долгое время работать без ремонта.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>Сл1. Более высокая себестоимость.</p> <p>Сл2. Продукт не продавался</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>V1. Быстрое продвижение на рынок.</p> <p>V2. Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>V3. Усовершенствование устройства.</p>	<p>V1C1C2C3C4 – быстрое продвижение на рынок в связи с преимуществами данного устройства.</p> <p>V2C1C2C3C4 – дополнительный спрос может появиться за счет усовершенствования устройства.</p>	<p>V1Сл2 – может не быть быстрого продвижения на рынок, так как редуктор ранее не продавался и потребители не знают этот продукт.</p> <p>V2Сл1Сл2 – отсутствие дополнительного спроса из-за несовершенства устройства.</p>

<b>Угрозы:</b>	У2С1С2С3С4 –	У1Сл1 –	высокая
У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.	возможность конкурировать в	себестоимость существенно	может снизить
У2. Кризис.	связи с хорошими показателями	продажи данного продукта.	
У3. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции со стороны государства.	основных характеристик		

Таблица 13 – Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны проекта			
		С1	С2	С3	С4
Возможности проекта	В1	+	+	+	+
	В2	+	+	+	+
	В3	0	0	0	0

На основании SWOT-анализа составляем интерактивную матрицу проекта, дающую общее представление о возможных вариантах стечения благоприятных и негативных факторов.

### 3.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого заполним специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.



Таблица 14 - Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации.

<b>№ п\п</b>	<b>Наименование</b>	<b>Степень проработанности научного проекта</b>	<b>Уровень имеющихся знаний у разработчика</b>
1	Определен имеющийся научно-технический задел	5	4
2	Определены перспективные направления научно-технического задела	4	3
3	Определены отрасли и технологии (товары и услуги) для предложения на рынке	4	3
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	3
5	Определены авторы и осуществлена охрана прав	2	2
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной стоимости	5	4
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	2
8	Разработка бизнес-плана коммерциализации научной разработки	1	1
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	3
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	1	1
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1

13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	1
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15	Проработан механизм реализации научного проекта	2	2
	<b>ИТОГО:</b>	<b>37</b>	<b>33</b>

По результатам, приведенным в таблице, можно оценить готовность научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Полученные баллы свидетельствуют о средней перспективности данного проекта.

### 3.2 Инициация проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта.

#### 3.2.1 Цели и результат проекта

Перед определением целей необходимо перечислить заинтересованные стороны проекта. Информация по заинтересованным сторонам представлена в таблице 15.

Таблица 15 - Заинтересованные стороны проекта

<b>Заинтересованные стороны проекта</b>	<b>Ожидание заинтересованных сторон</b>
Общественность	Новый продукт на рынке
Разработчик	Получение прибыли со своего продукта

Научный руководитель/студент	Выполненная выпускная квалификационная работа
------------------------------	---

Цели и результат проекта представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Цели и результат проекта

<b>Цели проекта:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Изучить литературу по требуемой тематике</li> <li>– Провести исследование разработанного волнового кинематического редуктора</li> <li>– Провести исследование разработанного 4-х координатного управляемого стола</li> </ul>
<b>Ожидаемые результаты проекта:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Проект, готовый к дальнейшей обработке – изготовлению в металле</li> </ul>
<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Выполненное исследование волнового кинематического редуктора</li> <li>– Выполненное исследование разработанного 4-х координатного управляемого стола</li> </ul>
<b>Требования к результату проекта:</b>	<b>Требование:</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Обоснование этапов исследования</li> <li>– Подведение общих выводов</li> </ul>

### 3.2.2 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта (табл. 17).

Таблица 17 - Ограничения проекта

<b>Фактор</b>	<b>Ограничения</b>
Бюджет проекта	100 тыс.
Источник финансирования	ТПУ
Сроки проекта	30.01.2023 – 21.05.2023
Дата утверждения плана управления проектом	6.02.2023
Дата завершения проекта	21.05.2023

### **3.3 Планирование управления научно-техническим проектом**

#### **3.3.1 Структура работ в рамках научного исследования**

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо оптимально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ. В данном пункте составляется полный перечень проводимых работ, определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Так как число исполнителей не превышает двух, то предпочтительным планированием работ является линейный график реализации проекта. Для его построения данные должны быть сведены в табл. 18.

Таблица 18 - Перечень этапов и распределение исполнителей

Основные этапы	№		Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Изучение материалов по теме	Студент
	3	Проведение патентного обзора	Студент

Теоретические и экспериментальные исследования	4	Составление принципиальной схемы	Студент
	5	Выполнение расчетов	Студент
	6	Построение модели волнового редуктора	Студент
	7	Построение модели мехатронного устройства	Студент
Проведение ОКР			
Разработка технологической документации	8	Исследование моделей	Студент
	9	Разработка документации	Студент
Оформление отчета	10	Написание пояснительной записки	Студент

Построим график проведения научного исследования в форме диаграммы Ганта (табл. 19). Синим цветом отмечена работа студента, зеленым – научного руководителя.

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Таблица 19 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Испол.	Т <sub>к</sub>	Продолжительность выполнения работ														
				Январь			Февраль			Март			Апрель			Май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель			■	■												
					■	■												
2	Изучение материалов по теме	Студент				■	■	■										
						■	■											
3	Проведение патентного обзора	Студент					■	■										
							■	■										
4	Составление принципиальной схемы	Студент						■	■									
								■	■									
5	Выполнение расчетов	Студент								■	■							
										■	■							
6	Построение модели волнового редуктора	Студент									■	■	■					
											■	■	■					
7	Построение модели мехатронного устройства	Студент									■	■	■					
											■	■	■					
8	Исследование моделей	Студент										■	■	■				
												■	■	■				
9	Разработка документации	Студент												■	■			
														■	■			
10	Написание пояснительной записки	Студент														■	■	
																■	■	

### 3.3.2 Бюджет научного исследования

В состав затрат на создание проекта включается стоимость всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих

содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости на выполнение данной разработки производится по следующим статьям затрат:

- материальные затраты НТИ;
- затраты по основной заработной плате исполнителей темы;
- затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы;
- отчисления внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- накладные расходы (прочие расходы).

### 3.3.3 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

Все расчеты по приобретению спецоборудования и оборудования, имеющегося в организации, сводятся в таблице 20.

Так как лицензия программного обеспечения требует амортизационных отчислений, ее стоимость не будем включать в бюджет затрат на спецоборудование, в общий бюджет включим только расходы на ее амортизацию, которые посчитаем в следующей статье.

Таблица 20 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1	Персональный компьютер	1	60	60
2	Лицензия SolidWorks	1	310	310
<b>Итого</b>			<b>60</b>	<b>60</b>

### 3.3.4 Расчет амортизационных отчислений

В статье «Амортизационные отчисления» от используемого оборудования рассчитывается амортизация за время выполнения работы для оборудования, которое имеется в наличии.

Амортизационные отчисления рассчитываются на время использования лицензии SW по формуле:

$$C_{AM} = \frac{N_A \cdot C_{OB} \cdot t_{BT} \cdot n}{F_D} \quad (15)$$

где  $N_A$  – годовая норма амортизации, равная 1, т.к. лицензия покупается на 1 год.

$C_{OB}$  – цена оборудования,

$F_D$  – 289 рабочих дней при шестидневной рабочей неделе, рабочий день – 8 часов, тогда  $F_D = 289 \cdot 8 = 2384$  ч.

$t_{BT}$  – время работы оборудования. В работе он был необходим 4 рабочих недели, соответственно, 192 ч.

$n$  – количество оборудования в работе.

$$C_{AM} = \frac{1 \cdot 310000 \cdot 192 \cdot 1}{2384} = 23966 \text{ руб.} \quad (16)$$

### 3.3.5 Основная заработная плата исполнителей

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы.

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (17)$$

$Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата;



Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p \quad (18)$$

$Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (19)$$

$$Z_m = Z_{\text{т.с.}} \cdot k_p \quad (20)$$

$Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$Z_{\text{т.с.}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_p$  – районный коэффициент, для Томска равный 1,3.

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 рабочих дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 рабочих дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, рабочих дней.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (21)$$

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15). Примем коэффициент равный 0,12.

Таблица 21 – баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	104	104
– выходные дни	14	14
– праздничные дни		
Потери рабочего времени	24	48
– отпуск	-	-
– невыходы по болезням		
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	199

Для руководителя:

$$З_{\text{дн.рук}} = \frac{27500 \cdot 1,3 \cdot 11}{223} = 1763 \text{ руб;} \quad (22)$$

$$З_{\text{осн.рук}} = 1356 \cdot 51 = 89\,936 \text{ руб;} \quad (23)$$

$$З_{\text{доп.рук}} = 0,12 \cdot 89936 = 10792 \text{ руб;} \quad (24)$$

$$З_{\text{зп.рук}} = 89\,936 + 10792 = 100\,728 \text{ руб.} \quad (25)$$

Для студента:

$$З_{\text{дн.ст}} = \frac{17500 \cdot 1,3 \cdot 10}{199} = 1143 \text{ руб;} \quad (26)$$

$$З_{\text{осн.ст}} = 879 \cdot 93 = 106319 \text{ руб;} \quad (27)$$

$$З_{\text{доп.ст}} = 0,12 \cdot 106319 = 12758 \text{ руб;} \quad (28)$$

$$З_{\text{зп.ст}} = 106319 + 12758 = 119\,077 \text{ руб.} \quad (29)$$

### 3.3.6 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством РФ нормам органам государственного

социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) \quad (30)$$

$k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). На 2019 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 12.

Таблица 22 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	89963	10792
Студент	106319	12758
Итого:	70 337	

### 3.3.7 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{накл} = (З_{осн} + З_{доп}) \cdot k_{нр} \quad (31)$$

$k_{нр}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы (принимается равным 0,16).

$$Z_{\text{накл}} = ((89963 + 10792) + (106319 + 12758)) \cdot 0,16 = 35173 \text{ руб.} \quad (32)$$

### 3.3.8 Формированию бюджета затрат

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основной для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 23.

Таблица 23 - Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Затраты по основной заработной плате исполнителей	196282
Зарплаты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	23550
Отчисления во внебюджетные фонды	70337
Расходы на специальное оборудование	60000
Накладные расходы	35173
Расходы на амортизацию	23996
Бюджет затрат НИИ	409338

На основании итоговых данных таблицы 13, можно сделать вывод о необходимости изготовления первого исполнения изделия исходя из экономической целесообразности.

### 3.4 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение сравнительной эффективности исследования проводят для текущего проекта и для аналогов.

Сравнительная эффективность связана с двумя величинами: интегральный финансовый показатель  $I_{\Phi}^p$  и интегральный показатель ресурсоэффективности  $I_m$ .

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{325342}{500000} = 0.65 \quad (33)$$

$\Phi_{pi}$  – стоимость проекта;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость (в т.ч. аналог)

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо численное удешевление бюджета затрат на разработку (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности можно вычислить по формуле:

$$I_m = \sum a_i \cdot b_i \quad (34)$$

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;

$b_i$  – балльная  $i$ -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Таблица 24 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

	<b>Весовой коэффициент параметров</b>	<b>Текущий проект</b>	<b>Аналог 1</b>	<b>Аналог 2</b>
1. Способствует росту производительности	0,2	5	4	4
2. Удобство эксплуатации	0,2	5	5	4
3. Экономичность производства	0,2	4	3	3
4. Надежность	0,2	4	4	4
5. Точность обработки	0,2	5	4	4
<b>Итого</b>	1	4,6	4	3,8

### 3.5 Заключение по разделу

В ходе выполнения данного раздела был проведен анализ перспективности данного проекта, рассмотрены различные варианты влияния благоприятных и негативных факторов.

На первом этапе работы была построена карта сегментирования рынка, анализ которой дает представление о том, какие области рынка сбыта наиболее актуальны для данного проекта. После этого проведен SWOT-анализ, моделирующий возможные варианты стечения благоприятных и негативных факторов. Далее, разбили проект на основные этапы работы и назначили исполнителей, провели расчет материальных затрат, связанных с выплатой заработной платы, отчисления во внебюджетные фонды и т.д. и посчитали общий уровень затрат для каждого исполнения.

Опираясь на полученные данные, можно сделать вывод о целесообразности изготовления управляемого координатного стола с

волновым кинематическим редуктором, так как для его реализации необходимо наименьшее количество материальных затрат, а именно 409338 рублей. По результатам оценки сравнительной эффективности исследования можно сказать, что управляемый координатный стол с волновым кинематическим редуктором является конкурентноспособным проектом.

## **4. Социальная ответственность**

### **Введение**

В данном разделе рассматриваются задачи, связанные с организацией рабочего места, проектирующего в соответствии с различными санитарными нормами, правилами безопасности и охраны окружающей среды.

Целью этого раздела является определение возможных вредных и опасных факторов разработки управляемого стола с волновым кинематическим редуктором, организация мероприятий по предотвращению неблагоприятного воздействия на состояние здоровья конструктора, формирование условий труда, перечисление организационных и технических мер, предусмотренных для ЧС, а также изучение вопроса окружающей среды.

Объектом исследования является 4-х координатный управляемый стол с волновым кинематическим редуктором для станков с ЧПУ. Используя программный комплекс SolidWorks, создается модель и ее проводятся исследования.

Рабочим местом, использованным для данной работы, принимаем помещение, оборудованное персональным компьютером. Используемое помещение – аудитория 16А корпуса Томского политехнического университета, размерами 3\*8 м.

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

#### **4.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства**

Научно-исследовательская работа выполнялась в учебной аудитории 16А корпуса Томского политехнического университета.

Основываясь на статье 91 Трудового кодекса Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. №197-Ф-2 (ред. От. 01.04.2019) рабочее время рассматривается как время, в течение которого работник в соответствии с правилами внутреннего трудового распорядка и условиями трудового



договора должен выполнять трудовые обязанности. Нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю.

Поступающие на работу допускаются к исполнению своих обязанностей только после вводного инструктажа о соблюдении мер безопасности, инструктажа на рабочем месте и после собеседования по вопросам техники безопасности. Проведение всех видов инструктажа регистрируется в журнале.

Защита персональных данных работника регламентируется статьями 86-90 Трудового кодекса Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019).

Сведения об оплате и нормировании труда приведены в разделе VI (ст. 129 - 163) Трудового кодекса Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019).

#### **4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя**

Согласно ГОСТ 12.2.049-80 "Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие эргономические требования", имеется ряд необходимых требований, которые предъявлены к рабочему месту сотрудников:

- эргономические требования к производственному оборудованию должны устанавливать его соответствие антропометрическим, физиологическим, психофизиологическим и психологическим свойствам человека и обусловленным этими свойствами гигиеническим требованиям с целью сохранения здоровья человека и достижения высокой эффективности труда.
- Эргономические требования к производственному оборудованию должны устанавливаться к тем его элементам, которые сопряжены с человеком при выполнении им трудовых действий в процессе эксплуатации, монтажа, ремонта, транспортирования и хранения производственного оборудования.

- При установлении эргономических требований к производственному оборудованию необходимо рассматривать оборудование в комплексе со средствами технологической и в необходимых случаях организационной оснастки.

Помимо этих требований, в ГОСТ 12.2.049-80 описаны общие характеристики рабочего места, требования к размещению рабочих органов управления и средств вывода информации:

- Рабочее место при выполнении работ в положении сидя должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78, в положении стоя - ГОСТ 12.2.033-78.
- Конструкция органов управления должна учитывать требуемую точность и скорость движений при осуществлении управления, а также частоту использования органа управления, антропометрические характеристики двигательного аппарата человека, необходимость быстрого распознавания органов управления, формирования и закрепления навыков по управлению.

Опишем рабочее место конструктора, проектирующего 4-х координатный управляемый стол с волновым кинематическим редуктором. Основными элементами рабочего места являются стол и стул. Стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие. Стул должен иметь конструкцию, исключаящую онемение тела из-за нарушения кровообращения при длительной работе на рабочем месте.

Основная рабочая поза – положение сидя – имеет наименьшее утомление. Рабочее место и оборудование должны гарантировать прямое и свободное положение корпуса тела работающего или наклон его вперед не более, чем на 15°. Для работы со средствами труда и документацией, все перечисленное должно быть в зоне досягаемости моторного поля (рис. 54).

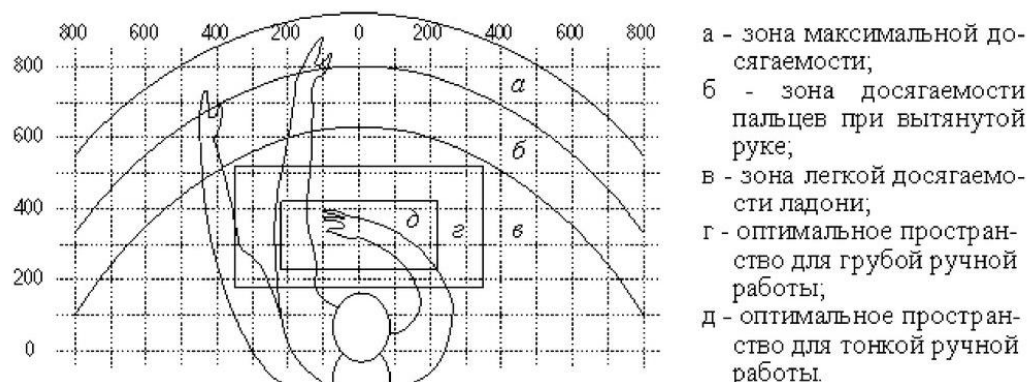


Рис. 54. Зоны досягаемости моторного поля в горизонтальной плоскости поля при проектировании

## 4.2 Производственная безопасность

Производство включает в себя наличие определенных вредных и опасных факторов (ГОСТ 12.0.002-14 «ССБТ. Основные понятия. Термины и определения»), которые можно разделить на группы: физические, химические, биологические и психофизиологические (ГОСТ 12.0.003-2015 «ССБТ. Опасные и вредные факторы. Классификация»).

На конструктора, работающего непосредственно с ПЭВМ, могут воздействовать производственные факторы, которые приведены в таблице 25.

Таблица 25 - Вероятные вредные и опасные факторы

№	Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1	Производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком необходимого искусственного освещения	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*; СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий;

2	Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде (повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума)	ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация; ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности; СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003.
3	Производственные факторы, связанные с отклонениями микроклимата рабочих мест	ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны; СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
4	Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий;	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов; ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты;

При работе на ЭВМ к концу рабочего дня возникают типичные ощущения: переутомление глаз, головная боль, тянущие боли в мышцах шеи, рук и спины, снижение концентрации внимания.

#### **4.2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов.**

##### **4.2.1.1 Отклонение показателей микроклимата**

Микроклимат различных производственных помещений контролируют некоторыми факторами:

- температура воздуха в помещении;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха.

Эти факторы влияют на функциональную деятельность человека, его здоровье, на работу различных вычислительных аппаратов. Понижение или

повышение значений этих факторов определяются как вредные факторы производства.

Нормы оптимальных условий устанавливает ГОСТ 12.1.005-88 (приложение 1). Работа оператора ЭВМ относится к категории Ia – работа с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт), производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением.

По ГОСТ 12.1.005-88 определяются оптимальные показатели микроклимата, с учетом категории работ по тяжести на основе общих энергозатрат организма в ккал/ч (табл. 26).

Таблица 26. Оптимальные и допустимые показатели микроклимата

Период года	Температура, °С			Относительная влажность, %		Скорость движения, м/с	
	Оптимальная граница	Верхняя граница	Нижняя граница	Оптимальная граница	Допустимый максимум	Оптимальная	Допустимый максимум
Холодный	22-24	24,5	21	40-60	75	0,1	0,1
Теплый	23-25	26	22	40-60	55	0,1	0,2

Чтобы удерживать эти нормы, необходимо иметь естественную вентиляцию помещения и кондиционер, обеспечивающий постоянную температуру, относительную влажность воздуха, скорость движения, чистоту. Вентиляция проходит естественным и механическим путем. В помещение должны проходить не менее 30 м<sup>3</sup> в час на одного человека при объеме помещения менее 20 м<sup>3</sup>. При большем объеме помещения допускается естественная вентиляция.

В зимний период для поддержки температуры на необходимом уровне требуется система центрального водяного отопления по СНиП-41-01-2003 (Отопление, вентиляция и кондиционирование).

#### **4.2.1.2 Превышение уровня шума**

В помещениях, предназначенных для проектировочных работ с использованием ПЭВМ, уровень шума не должен превышать значений, утвержденных действующими нормативами. Нормативным эквивалентным уровнем звука (уровень звука, воздействующий на работающего за рабочую смену) на рабочих местах в классных помещениях, учебных кабинетах, аудиториях учебных заведений, конференцзалах и т.д. в соответствии с СП 51.13330.2011 (табл.25) равен 40 дБА. Максимальный уровень звука – 55 дБА.

Основным источником шума может являться внешняя среда (уличные и дорожные звуки, соседние помещения, коридоры). От такого шума необходима качественная изоляция помещения. Повышение звукоизоляции окон может быть достигнуто увеличением толщины стекол, увеличением толщины воздушного промежутка между стеклами, закреплением стекол в переплетах с помощью упругих прокладок, применением запорных устройств, обеспечивающих плотное закрытие окон.

Повышение изоляции воздушного шума дверями и воротами может быть достигнуто за счет увеличения поверхностной плотности их полотна, за счет плотной пригонки полотна к коробке, за счет устранения щели между дверью (воротами) и полом при помощи порога с уплотняющими прокладками. Необходимо также предусматривать запорные устройства, обеспечивающие плотный прижим двери (ворот) к коробке, замочные скважины должны быть закрыты.

#### **4.2.1.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Работая при освещении плохого качества или низких уровней, люди могут ощущать усталость глаз и переутомление, что приводит к снижению работоспособности.

По СП 52.1333.2016 (Естественное и искусственное освещение) норма освещения для учебных кабинетов и лабораторий высших учебных заведений

в горизонтальной плоскости при уровне стола над полом в 0,8 м принимается в 400 лк.

Нормальная освещённость достигается в дневное время за счёт естественного света, попадающего в помещение через окна, в утренние и вечерние часы за счёт искусственного освещения светильниками. Для производственных помещений выгоднее использовать люминесцентные лампы, встроенные в потолок. В дневное время рекомендуется открывать жалюзи либо шторы. При недостатке освещения в утреннее или вечернее время необходимо предусмотреть дополнительные источники освещения.

В качестве источников искусственного света в нашем проекте будем использовать люминесцентные лампы.

Проектирование искусственного освещения заключается в выборе системы освещения, определению количества светильников, их типа и мест размещения.

Размещение светильников определяется такими размерами, как:

$H = 3$  м – высота стен помещения;

$h_c$  – расстояние светильников от перекрытия;

$h_{\Pi} = H - h_c = 2,5$  м – высота светильника над полом;

$h_p$  – высота рабочей поверхности над полом;

$h = h_{\Pi} - h_p$  – расчетная высота светильника над рабочим столом.

Расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h \quad (35)$$

Где  $\lambda = \frac{L}{h}$  – величина, характеризующая наивыгодное относительное расстояние между светильниками. Принимаем значение в 1,3 для люминесцентных ламп.

Найдем высоту светильника над рабочим столом:

$$h = h_{\Pi} - h_p = 2,5 - 0,8 = 1,7 \text{ м}; \quad (36)$$

Расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1,3 \cdot 1,7 = 2,21 \text{ м}; \quad (37)$$

Расстояние  $I$  от крайних светильников или рядов до стены:

$$I = \frac{L}{3} = \frac{2,21}{3} = 0,7 \text{ м}; \quad (38)$$

Светильники расположим в три ряда. В одном ряду определим три светильника типа ШОД-2-40 (по две лампы 40В в одном светильнике). План помещения и размещения в нем светильников показан на рис. 2. Общее количество ламп в помещении  $n = 9 \cdot 2 = 18$  ламп.

Изобразим в соответствии с исходными данными план помещения, обозначим место крепления светильников и их количество (рис. 2).

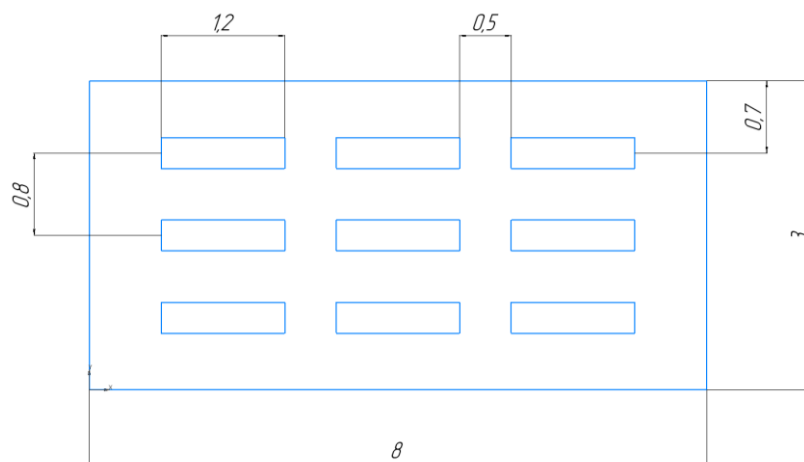


Рис. 55. Разметка помещения

Индекс помещения можно найти как:

$$i = \frac{S}{h(A + B)} = \frac{8 \cdot 3}{1,7 \cdot (8 + 3)} = 1,25 \quad (39)$$

Тогда, коэффициент использования светового потока:

$$\eta' = 0,43$$

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен.

Световой поток лампы  $\Phi$  определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N_l \cdot \eta'} \quad (1),$$

Где  $E_n$  – нормативная освещённость по СП 52.13330.2016, лк;



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

$K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т. е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли;

$Z$  – коэффициент неравномерности освещения (для люминесцентных ламп 1.1);

$N_{л}$  – число ламп в помещении (необходимо учесть число ламп в светильнике);

$\eta'$  – коэффициент использования светового потока.

Световой поток ламп в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{300 \cdot 24 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{18 \cdot 0,43} = 1590 \text{ Лм}$$

Рассчитав световой поток  $\Phi$ , зная тип лампы, по таблице выбираем стандартную ближайшую лампу, определяем электрическую мощность всей осветительной системы. Если необходимый поток светильника выходит за пределы диапазона (-10 ÷ +20%), то корректируется число светильников  $n$  либо высота подвеса светильников.

Выбираем лампу – ЛД30 с потоком 1650 Лм. Выполняем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{стандарт}} - \Phi_{\text{расчет}}}{\Phi_{\text{стандарт}}} \cdot 100\% \leq +20\% \quad (40)$$

$$-10\% \leq \frac{1650 - 1590}{1650} \cdot 100\% \leq +20\% \quad (40)$$

$$-10\% \leq 3,6\% \leq +20\% \quad (41)$$

Необходимый поток светильника не выходит за пределы диапазона (-10 ÷ +20%), то корректировать число светильников  $n$  либо высоту подвеса светильников нет необходимости.

Определим электрическую мощность осветительной установки:

$$P = \omega \cdot S = 30 \cdot (3 \cdot 8) = 720 \text{ Вт} \quad (42)$$

Отсюда мощность каждой лампы:

$$P_{л} = \frac{P}{n} = \frac{720}{18} = 40 \text{ Вт} \quad (43)$$

Мощность установки:

$$P = N_{л} \cdot P_{л} = 18 \cdot 30 = 540 \text{ Вт} \quad (44)$$

#### 4.2.1.4 Электрический ток, вызванный разностью потенциалов

Электротравмы в большинстве случаев возникают по причине нарушения требований охраны труда, требований к организации рабочих мест и трудового процесса, что предшествует наступлению несчастных случаев на производстве. Основной причиной несчастных случаев, обусловленных действием электрического тока, как правило, являются нарушения правил техники безопасности при работе с бытовыми электроприборами и промышленными электроустановками.

Мерами предупреждения подобных случаев являются проведения инструктажей по технике безопасности, проектирование рабочих мест с учетом Общих требований к организации безопасного рабочего места, утвержденных Приказом Минтруда России от 29.10.2021 N 774н.

К техническим методам предупреждения поражений током относятся: содержание в работоспособном состоянии, проверка и безопасная эксплуатация электрооборудования, включающая его техобслуживание и ремонт, применение надлежащей изоляции, применение защитных устройств от случайных прикосновений, использование электрозащитных средств, соответствие технических характеристик и параметров технологического режима работы электроустановок указанным в п.6 Правил (Приказ Минэнерго России от 12.08.2022 N 811 "Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии" (Зарегистрировано в Минюсте России 07.10.2022 N 70433)) требованиям, обеспечивающим нахождение параметров электроэнергетического режима работы электроэнергетической системы в пределах допустимых значений, и т.п.

### 4.3 Экологическая безопасность

Защита окружающей среды в наше время является одной из самых приоритетных задач. Огромное количество отходов является огромной проблемой. Чтобы уменьшить их количество, необходимо отказаться от старых методов производства и перейти на новый, безотходный уровень промышленности.

В процессе проектирования управляемого стола с волновым редуктором, в качестве промышленных отходов в основном выступает бумага. Такой мусор с другими отходами вывозится в определенные места, оборудованные под склады. Сжигание этих отходов уменьшает их объемы почти на 90%, но, как следствие, пары выделяются в атмосферу [36]. Эти последствия можно уменьшить, используя электронные форматы документов, почту и т.д.

Утилизация ПЭВМ происходит путем передачи их в специализированные службы, в которых они разбираются на составные части, сортируются, дробятся в измельчителе и передаются на дальнейшую переработку [38].

В процессе изготовления проекта остается металлическая стружка, которая собирается, увозится в пункты переработки, и в дальнейшем переплавляется в новые заготовки [39].

В процессе использования проекта возможно загрязнение гидросферы – использование СОЖ и прочих синтетических жидкостей, которые попадают в канализацию. В соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 по степени воздействия на организм вредные вещества подразделяются на четыре класса опасности I (чрезвычайно опасные); II (высокоопасные); III (умеренно опасные); IV (малоопасные). Класс опасности вредных веществ устанавливается в зависимости от норм и показателей. Тип СОЖ подбирается под конкретную операцию производства. [40]

Снизить негативное влияние СОЖ можно путем разложения использованных жидкостей, утилизации их другими способами; перейти на использование новых чистых жидкостей без вредных примесей и соединений.

#### **4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

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

Проектирование 4-х координатного управляемого стола с волновым редуктором не может инициировать возникновение каких-либо ЧС, так как не производят поражающих факторов физического или химического характера.

##### **4.4.2 Анализ возможных ЧС, которые могут возникнуть в помещении при разработке**

При проведении исследования возможно возникновение такого вида возможного ЧС, как техногенные аварии, связанные с возникновением пожара в производственном помещении; причинами возникновения данного вида аварии в помещениях является несоблюдение правил техники безопасности при эксплуатации пожароопасных и легковоспламеняющихся приборов, таких как удлинители, электрощитки, приборы освещения, компьютеры и периферия.

При возникновении пожара необходимо незамедлительно обратиться в службу спасения. Затем оповестить персонал о возникновении пожара нажатием на кнопку сигнализации. При опасности поражения электротоком, помещение необходимо обесточить. После чего можно приступать к тушению пожара. Для тушения электрооборудования применяют углекислотные огнетушители.

На основании Федерального закона от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 30.04.2021) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" производственные помещения оборудованы следующими средствами пожаротушения: огнетушитель ручной углекислотный ОУ-5, пожарный кран

с рукавом, также каждое помещение оборудовано системой противопожарной сигнализации.

#### **4.5. Заключение по разделу**

В ходе работы были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности; производственная и экологическая безопасность; безопасность в чрезвычайных ситуациях. Был проведен расчет освещения, спрогнозированы основные мероприятия по устранению возможных негативных последствий рабочих.

Согласно правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок персонал должен обладать I группой допуска по электробезопасности. Присвоение группы I по электробезопасности производится путем проведения инструктажа, который должен завершаться проверкой знаний в форме устного опроса и (при необходимости) проверкой приобретенных навыков безопасных способов работы или оказания первой помощи при поражении электрическим током.

Категория помещения по электробезопасности, согласно ПУЭ, соответствует первому классу – помещения без повышенной опасности.

Категория тяжести труда в лаборатории по СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" относится к категории Ib (работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся физическим напряжением

Категория помещения соответствует группе А, возможный класс пожара В.

Рассмотренный объект, оказывающий незначительное негативное воздействие на окружающую среду, относится к объектам III категории. Необходимо в дальнейшем рассмотреть способы утилизации отходов производства подобных устройств.

## Заключение

В результате выполнения этой работы был проведен патентно-литературный обзор, рассмотрены различные схемы конструкций. Разработана конструктивная схема 4-х координатного управляемого стола с волновым кинематическим редуктором. Определены рабочие зоны такого приспособления, его возможные погрешности. Так как в данном управляемом столе главное место занимает волновой кинематический редуктор, провели исследования такого зубчатого зацепления по таким характеристикам как:

- Наличие нежелательной интерференции в зубчатом зацеплении;
- Плавность хода;
- Качение зубьев;
- Путь трения;
- Нагрузочная способность передачи;
- Прочностной расчет зуба;
- Несущая способность зуба.

В рамках патентного обзора не было найдено аналогов волнового кинематического редуктора с предложенным профилем зуба, поэтому такой редуктор можно оценивать как достаточно перспективную тему для развития и внедрения в различные отрасли промышленности.

Рассчитали ресурсоэффективность проекта. Сделали вывод о целесообразности изготовления управляемого координатного стола с волновым кинематическим редуктором, так как для его реализации необходимо наименьшее количество материальных затрат, а именно 409338 рублей. По результатам оценки сравнительной эффективности исследования можно сказать, что управляемый координатный стол с волновым кинематическим редуктором является конкурентноспособным проектом.

В ходе проведения раздела «Социальная ответственность» были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения

безопасности; производственная и экологическая безопасность; безопасность в чрезвычайных ситуациях. Был проведен расчет освещения, спрогнозированы основные мероприятия по устранению возможных негативных последствий рабочих.

## Список литературы

1. Егоров, О.Д. Прикладная механика мехатронных устройств. Учебное пособие / О.Д. Егоров. – Москва: ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2013. – 229 с.
2. Васильева, С.Н. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем / С.Н. Васильева, Э.В. Гринцевич // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. №16. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsiyu-postroeniya-i-sovremennye-tendentsii-razvitiya-mehatronnyh-sistem>. – Дата публикации: 2010.
3. Подураев, Ю.В. Основы мехатроники: учебное пособие / Ю.В. Подураев. – Москва: ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2000. – 80 с.
4. Волчкевич, Л. И. Автоматы и автоматические линии: учебное пособие: В 2 частях / Л. И. Волчкевич, М. М. Кузнецов, Б. А. Усов; под ред. Г. А. Шаумян. – Москва: Высшая школа, 1976. – Часть 2. Системы управления и целевые механизмы. – 332 с.
5. Волчкевич, Л.И. Комплексная автоматизация производства / Л.И. Волчкевич, М.П. Ковалев, М.М. Кузнецов. – Москва: Машиностроение, 1983. – 269 с.
6. Что такое координатный стол? // Purelogic R&D: сайт. – URL: <https://purelogic.ru/articles/chto-takoe-koordinatnyu-stol/> (дата обращения: 12.04.2023)
7. Литвин, Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений / Ф. Л. Литвин. – Москва : Наука, 1968. – 584 с.
8. Решетов, Д.Н. Детали машин: учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов / Д.Н. Решетов. – Москва: Машиностроение, 1989. – 496 с.
9. Зубчатые передачи: Справочник / Е. Г. Гинзбург, Н. Ф. Голованов, Н. Б. Фирун, Н. Т. Халевский. – 2-е, перераб. и доп. – Ленинград: Машиностроение, 1980. – 416 с.



10. Куклин, Н. Г. Детали машин: учеб. для машиностроит. спец. техникумов / Н. Г. Куклин. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 1987. – 383 с.
11. Прикладная механика / В. М. Осецкий, Б. Г. Горбачев, Г. А. Доброборский [и др.]. – изд. 2, перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1977. – 488 с.
12. Методологические особенности концептуального конструирования мехатронных систем в робототехнике / М. С. Кухта [и др.] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 04-07 декабря 2017 г., г. Томск. — Томск: Изд-во ТПУ, 2018. — [С. 171-172].
13. Волновые передачи // Теория машин и механизмов: сайт. – URL: <http://www.teormach.ru/lect14.htm> (дата обращения: 17.04.2023)
14. Система управления координатным столом: сайт. – URL: <https://mobilpiu.ru/sistema-upravleniya-koordinatnym-stolom/> (дата обращения: 17.04.2023)
15. Признаки и состав мехатронных систем: сайт. – URL: <https://emkelektron.webnode.com/news/priznaki-i-sostav-mekhatronnykh-sistem> (дата обращения: 16.05.2023)
16. Патент № 170915 U1, Российская Федерация, МПК F16H 55/08. Зубчатая передача: № 2016137012: заявл. 15.09.2016: опубл. 15.05.2017 / Йоппа А.В., Крауиньш Д.П., Крауиньш П.Я., Степанова Д.Л., Янович А.А. – 7 с.
17. Степанова Д.Л., Никулин П.А., Крауиньш П.Я. Исследование распределения нагрузки волнового кинематического редуктора с модифицированным профилем зуба и зависимости нагрузочных способностей по отношению к его передаточному числу и габаритным размерам // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №4 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/96TVN416.pdf>

- 18.Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т.: Т.2. / В. И. Анурьев. – 8-е изд., перераб. и доп.. – Москва : Машиностроение, 2001. – 912 с.
- 19.Санитарные правила и нормы. СанПин 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда» от 01.01.2021 № 12.2.032 N 40 // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2020
- 20.Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 25.02.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022)
- 21.ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования: дата введения 01.04.2001. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 9 с.
- 22.ГОСТ 12.2.049-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие эргономические требования: дата введения 01.10.2001. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 15 с.
- 23.ГОСТ 12.0.002-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Термины и определения: дата введения 01 апреля 2019. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 32 с.
- 24.ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Поправками): дата введения 23 августа 2021. – Москва: Стандартинформ, 2009. – 16 с.
- 25.Санитарные правила и нормы. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\* (с Изменениями N 1, 2) от 28.12.2021 № 52.13330.2016 // Официальный сайт Минстроя России. – 2016

- 26.ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация: дата введения 01 апреля 2001. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 4 с.
- 27.ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (Переиздание): дата введения 01 сентября 2019. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 27 с.
- 28.СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменениями N 1, 2, 3): дата введения 31 мая 2022. – Москва: ОАО "ЦПП", 2010. – 46 с.
- 29.Санитарные правила и нормы. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» от 03.02.2021 № 2 1.2.3685-21 //// Официальный интернет-портал правовой информации. – 2022
- 30.ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1): дата введения 01 января 2008. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 50 с.
- 31.ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1): дата введения 01 июня 2001. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 50 с.
- 32.ГОСТ 12.1.019-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты (с Поправкой): дата введения 01 января 2021. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 22 с.
- 33.СП 60.13330.2020 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха СНиП 41-01-2003 (с Поправкой, с Изменением N 1): дата введения 30 мая 2022. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 60 с.

34. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 29 октября 2021 г. N 774н "Об утверждении общих требований к организации безопасного рабочего места" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 25 ноября 2021 г. Регистрационный N 65987)
35. Приказ Минэнерго России от 12.08.2022 N 811 "Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии" (Зарегистрировано в Минюсте России 07.10.2022 N 70433))
36. Мубаракшина Ф. Д., Гусева А. А. Современные проблемы и технологии переработки мусора в России и за рубежом // Известия КазГАСУ. 2011. №4 (18). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-problemy-i-tehnologii-pererabotki-musora-v-rossii-i-za-rubezhom>
37. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (с Изменениями N 1, 2): дата введения 01 апреля 2007. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 5 с.
38. Медведев Аркадий, Арсентьев Сергей. Утилизация продуктов производства электроники // Компоненты и Технологии. 2008. №87. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-produktov-proizvodstva-elektroniki>
39. Кукуй Д.М., Емельянович И.В., Петровский В.П., Ровин Л.Е., Ровин С.Л. Опыт утилизации металлической стружки // Литьё и металлургия. 2009. №1 (50). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-utilizatsii-metallicheskoj-struzhki>
40. Хамидуллова Л. Р., Васильев А. В. Классификация и комплексная оценка смазочно-охлаждающих жидкостей по степени воздействия на человека и биосферу // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. №5-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-i-kompleksnaya-otsenka-smazочно-ohlazhdayuschih-zhidkostey-po-stepeni-vozdeystviya-na-cheloveka-i-biosferu>

## Приложение А

(справочное)

### Review of literature

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ11	Манапова Марина Савиловна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Крауиньш Петр Янович	д.т.н., профессор		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Преподаватель	Тайдонова Светлана Сергеевна	к.ф.н.		
Доцент	Полякова Наталья Владимировна	к.ф.н., доцент		

## **1. Review of literature**

### **1.1. Mechatronic device**

A mechatronic device is a device designed as a result of the synergy of elements of precision mechanics, electronics, computer control and designed to implement controlled movements of its output components.

Depending on the level of integration of mechatronic device's elements and its functional purpose, there are:

- mechatronic modules;
- mechatronic machines;
- mechatronic systems;
- mechatronic complexes.

A mechatronic module is a functionally and structurally independent product built with interpenetration and synergetic hardware and software integration of its constituent elements having different physical nature, and designed to implement the required controlled functional movement of its output link.

The primary feature distinguishing mechatronic devices is the presence of three mandatory parts: mechanical (electromechanical), electronic and computer. The second feature is the use of the principle of minimum transformations – the use of high-torque or linear motors. Also, the principle of combining functions should be used in the device – several tasks are assigned to one element.

The mechatronic device includes:

- A mechanism consisting of a housing, a drive and an output mechanical link. The latter may include a power element, a mechanical transmission of motion, a working organ, etc.;
- power amplifier of the power element;
- power amplifier control device;
- internal information system (sensors of the state of the mechatronic node itself, means of processing information from sensors);

- external information system (sensors of information about the external environment of the mechatronic node, means of processing this information);
- mechatronic node control device.

Examples of modern mechatronic devices are modules of machine tools and industrial robots, external memory devices of computers, printers, household appliances, etc. A mechatronic device can be either a machine or a node (functional element, module) of a machine.

## 1.2. Rotating and fixing mechanisms

In automatic and semi-automatic machines, aggregate machines and automatic lines, various rotation mechanisms are widely used with subsequent fixation of the position of the rotated unit.

The devices for moving the tool are used for sequential processing of the part with a set of different tools, as well as if it is necessary to automatically replace the quick-wearing tool.

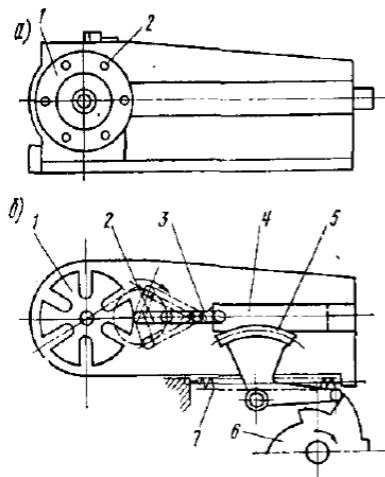


Fig.1. Example of a rotating device - automatic turret 1B136.

Rotating and fixing devices include the following groups of target assemblies:

- 5) Rotating devices on which tools or workpieces are fixed (oscillating fixtures, turrets, turntables, etc.);
- 6) Orientation measuring machines where workpieces are rotated by a given angle for subsequent machining on the other side (tables for rotating parts by

90° and 180° around the vertical axis, drums for rotating parts by 90° and 180° around the horizontal axis, rotary trays, etc.);

- 7) Rotary drives, which ensure that the units are rotated and stopped;
- 8) Fixing mechanisms that ensure the exact positioning of tools or workpieces.

There are a huge number of requirements for such devices:

5. Fast and accurate positioning of the tool and workpiece in the working position;
6. The smoothness of the turn;
7. No shocks or jolts during operation of the mechanism as this leads to wear and tear and loss of strength.
8. At the end of the turn, the speed of the assembly must be zero - this eliminates the impact on the retainer, which should stop the moving assembly due to its inertia, increasing the accuracy and reliability of the mechanism.

### **1.2.1. Coordinate tables**

A coordinate table is a special mechatronic system used for precise movement of a machine tool mechanism or workpiece along a required path. Today, a coordinate table combines a support leg, an electronic control system, drives and an assignment mechanism. Using digital numerical control, the production process is automated. At high working speeds the accuracy of the workpiece production is within microns.

Turntables normally consist of:

- The base, similar to the bed, has attachment systems to the machining area of the machine.
- The faceplate is the place where the workpiece is fastened. It has grooves on its surface for inserting workpieces, with either a straight hole or Morse taper in the centre.
- Moving mechanism - to move the assembly to the required distance.





Fig.2. Turntable Haas HRT450.



Fig.3. Directly driven CNC turntable FAD-200.

The more axes of rotation, the more opportunities to process the workpiece from different sides without having to stop to change the position of the workpiece, the shorter the re-positioning times and the higher the efficiency.

CNC rotary table systems increase the number of possible machining operations and make it possible to create parts with particularly complex configurations, e.g. spiral grooves, etc.

### **1.3. Gearings**

#### **1.3.1. Overview**

A gear transmission is a mechanism which, by means of gearing, transmits or converts motion by variation of angular velocities and moments.

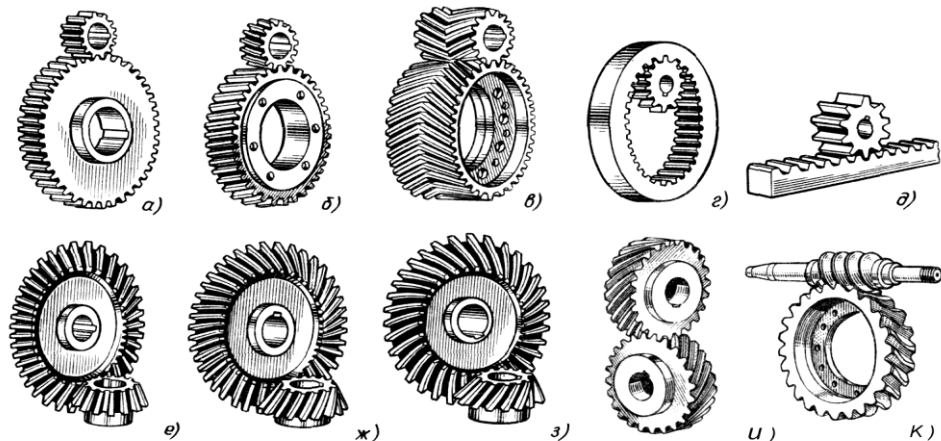


Fig. 4. Types of gearing: а, б, в – spur gears with external gearing; г – spur gear with internal gearing; д – rack and pinion gear; е, ж, з – bevel gears; и – helical gear; к – worm gear.

In a gear train, the smaller gear wheel of the pair is called a gear and the larger one is called a gear wheel or simply a wheel. A gear train is made up of a series of toothed wheels that are meshed together to form a series of cams working in series.

Gears are used to convert and transmit rotary motion between shafts with parallel, intersecting or overlapping axes and to convert rotary motion into translational motion and the other way round.

These transmissions are the most common in today's machine and equipment construction and are used in a wide range of speeds and powers.

The main advantages of gearing:

- constant transmission ratio  $i$ ;
- reliability and durability of operation;
- space-saving;
- wide range of transmissible speeds;
- low pressure on shafts;
- high efficiency;
- easy maintenance.

The disadvantages of gears include:

- the requirement for high precision manufacturing and assembly;
- noise at high speeds;
- the impossibility of stepless adjustment of the transmission ratio  $i$ ;
- high rigidity, which makes it impossible to fully balance dynamic loads;
- the need for special machines and tools for gear cutting.

### 1.3.2. Basic laws of meshing

In order for a pair of gears with a constant gear ratio to work properly, the tooth profiles must be drawn along curves that conform to certain laws. These laws are a consequence of the meshing theorem.

The basic meshing theorem (Willis's theorem) can be defined as this: profiles transmitting rotation between parallel axes with a ratio of angular velocities varying according to a given law must be such that the common normal of the profiles at their point of contact passes through the momentary meshing pole.

The momentary meshing pole is the point on the centre distance line dividing it into segments which are inversely proportional to the ratio of momentary angular velocities. That is, for a constant velocity ratio, the momentary pole remains constant in the stationary plane.

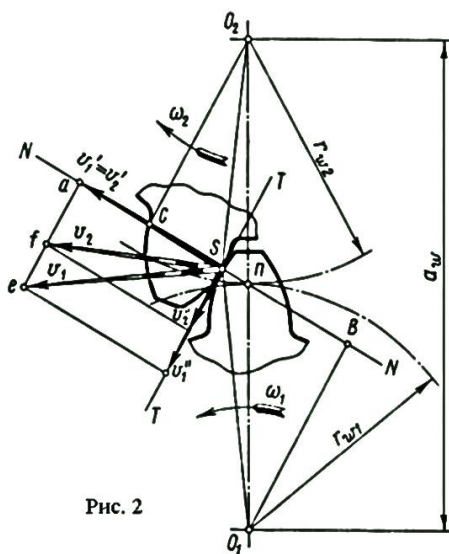


Fig. 5. Elements of the gearing.

As the profiles work, the touch point constantly moves along the line NN. This line is the contact line.

### 1.3.3. Involute gearing

Most of the transmissions in use today have gears with involute tooth profiles. The involute gearing was first designed by L. Euler. The involute of a circle is its sweep. The circle whose involute is used for the tooth profile is called the basic circle or evolute.

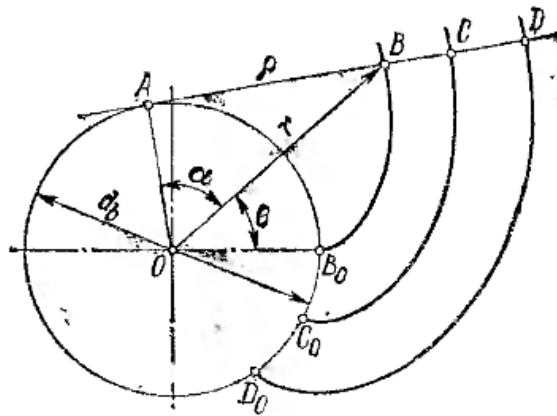


Fig. 6. The involute of a circle.

The involute gearing is linear, the contact between the profiles is along a line along the tooth.

The nature and parameters of the meshing are determined by the involute properties such as:

- the normal to the involute is tangential to the main circle at any point;
- the length of the segment AB of the involute normal is equal to the length of the arc  $AB_0$  of the main circle;
- point A of the main circle is the curvature centre of the involute at point B;
- all involutes of the same circle are equidistant.

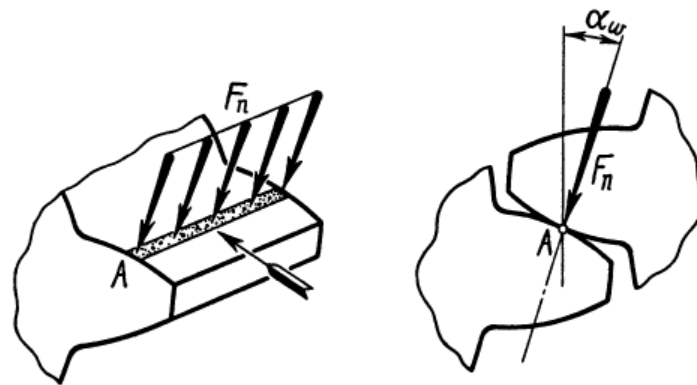


Fig. 7. Diagram of contact plate movement in involute gearing.

The main advantages of Euler gearing include:

- the simplicity of the shaping tool working by the running-in method, as a result of the increased manufacturing accuracy;
- constant gear ratio. The gearing pole is invariably on the centre line, the gearing line runs tangentially to the main circles;
- constant gearing and bearing forces at constant power, since the gearing line is a straight line;
- smooth and quiet operation;
- durability and ease of servicing.

The disadvantages of involute gearing are:

- difficult to repair;
- higher noise and vibration at higher speeds;
- low contact strength: both teeth have a convex profile.

#### 1.3.4. Novikov gearing

M.L. Novikov proposed a new point gearing in which the tooth profiles in the face planes are drawn on circular arcs, thus increasing the reduced radius of curvature and increasing the contact strength of the gear.

Moreover, two variations are possible with this shape:

- One gear with concave spherical teeth and the other with convex teeth.
- Mixed design, where the tooth profile is made up of two spherical lines rather than one.

In this type of meshing, contact is made at a point and the teeth touch only when the profiles pass through this point; continuity of transmission is ensured by helical shape of the teeth. It is for this reason that Novikov gearing can only be helical with an angle  $\beta = 15 \dots 20^\circ$ .

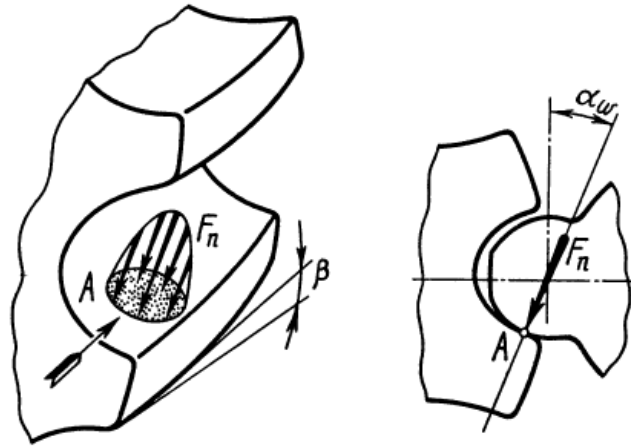


Fig. 8. Diagram of contact area motions in Novikov meshing.

As a result of the new tooth shape, the load limit has been increased by 50%. Thus, a reducer with Novikov gears will have one and a half to two times less dimensions and weight at the same load as a conventional one. Their production requires modification of conventional gear-cutting machines, but the technical complexity is low. On a well-established production line, the cost of producing Novikov gears is not much different from classic gearboxes.

It has been noticed that the contact area, through which the load is transmitted, is small in a gear with a classic tooth profile. The classic trapezoidal tooth shape has been chosen by many designers since the dawn of the mechanical engineering era and represents a compromise between load capacity, manufacturability and simple design.

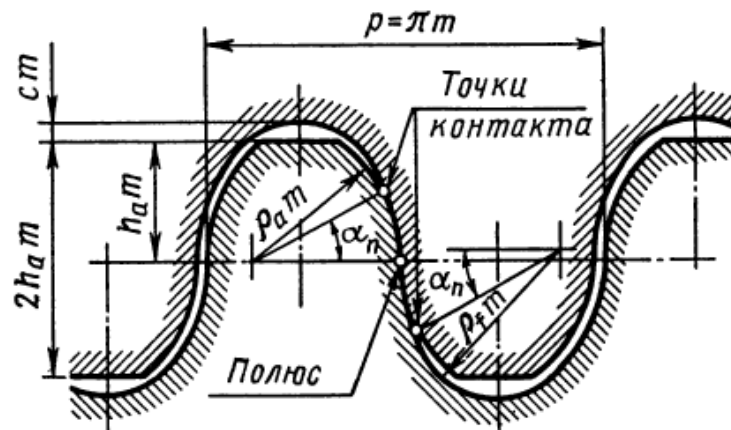


Fig. 9. The original Novikov transmission contour.

The advantages of this type of gearing:

- use of higher gear ratios;
- increased contact and bending strength;
- high service life and reduced friction losses due to grease retention at the contact points;
- high transmission efficiency.

A major disadvantage of these gears is their increased sensitivity to variations in axial spacing and load fluctuations.

### 1.3.5. Wave reducers

There are a large variety of wave mechanism designs. Typically, these mechanisms change an input rotary motion into an output rotary or translational motion.

Wave gears are based on the principle of transmitting rotary motion by running wave deformation of one of the gears. Kinematically, it is a planetary gear with one flexible gear wheel. It was patented by the American engineer Masser in 1959.

The most common wave transmission consists of a carrier H, a rotating flexible wheel 1 with outer teeth and a fixed rigid wheel 2 with inner teeth.

The carrier consists of an oval cam and a special ball bearing. The flexible wheel is usually made in the form of a cup with a thin wall which deforms easily,

the cup is connected to the shaft. The length of the sleeve is close to its diameter. A rigid gear wheel is connected to the housing. The gear teeth are usually involute.

The meshing is carried out by deformation of the flexible wheel by the carrier. The deformed ring gear of the flexible wheel takes on an oval shape, forming two satellites connected by a flexible housing wall.

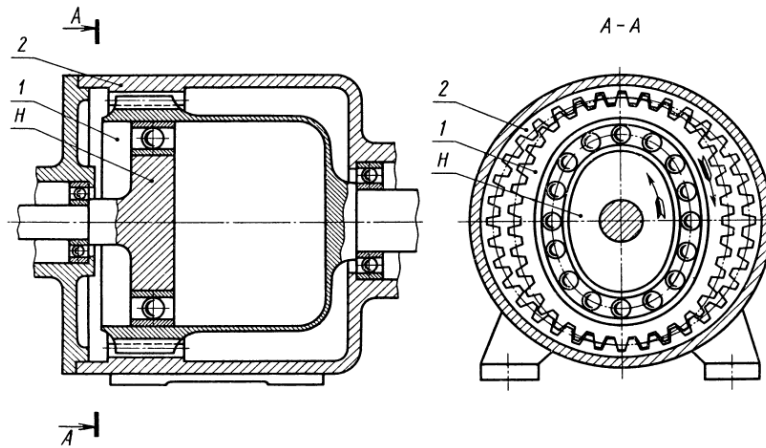


Fig. 10. Waveform transmission scheme.

The flex-wheel is deformed so that on the ends of the large oval axis the teeth are engaged to their full working height. On the minor axis the teeth are not engaged. Between these areas the engagement is partial. A wave gear can ensure that a large number of teeth are meshed at the same time.

In a wave transmission, motion is transformed by deformation of the flexible gear ring. As the driver rotates, a wave of deformation runs around the circumference of the flexible ring gear; the ring gear rolls in the opposite direction on the stationary rigid wheel, rotating the cup and the shaft. Therefore, the gear is called a wave gear and the carrier is called a wave generator.

Wave gears have less mass and dimensions, greater kinematic accuracy, less dead time, high vibration resistance due to vibration damping (energy dissipation) and give less noise.

If necessary, such transmissions allow motion to be transmitted in a hermetic space without the use of sealing glands, which is particularly valuable for aircraft, space and underwater technology, as well as for machines in the chemical industry.



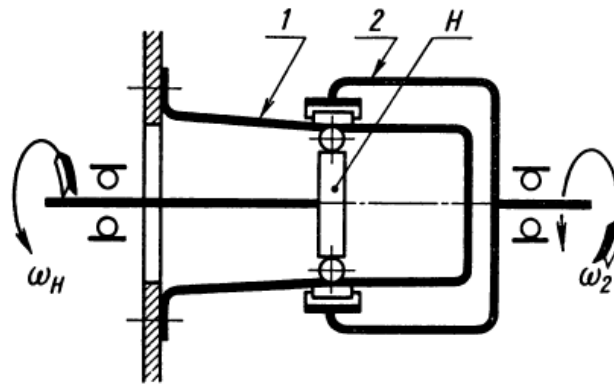


Fig. 11. Schematic of the wave transmission of motion into the hermetic space.

There are a few advantages of wave transmissions:

- the ability to transmit high loads with small dimensions, as up to one third of all the teeth are in mesh at the same time;
- high transmission ratio with small dimensions and relatively high efficiency;
- low dead range and high kinematic accuracy;
- possibility of transferring motion in a sealed space without the use of seals;
- operation with less noise and high damping capability;
- low moment of inertia reduced to the input shaft.

The disadvantages of this type of gearing:

- almost individual, expensive, very time-consuming manufacture of the flexible wheel and the wave generator;
- the possibility of using these gears only at relatively low angular speed of the generator shaft at large wheel diameters;
- limited revolutions of the drive shaft (to avoid large centrifugal forces of inertia of the non-circular wave generator; small tooth modules of 1,5-2 mm).

### 1.3.6. Cogwheel reducers

These reducers are based on simplified cycloidal gearing. The teeth are in the form of cylinders (cogwheels) fixed between two discs. The tooth profile of the second wheel is described by an equidistant pattern offset from the epicycloid by the radius of the cogwheel (Fig. 12).

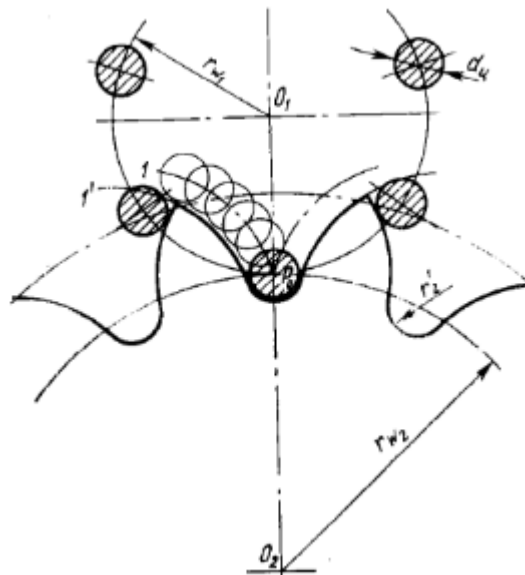


Fig. 12. Cogwheel reducer contour.

The wheel tooth profile can also have a circular arc shape (Fig. 13) which is close to the epicycloid. The cogs are either stationary or rotating on axles. In the latter case, friction losses are significantly reduced, but the wheel design becomes more complex.

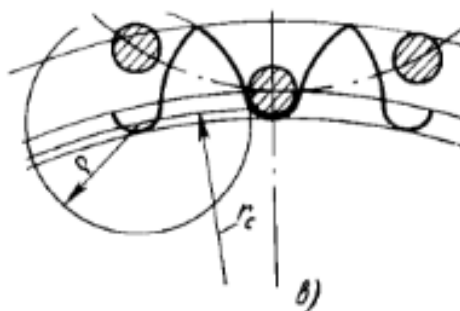


Fig. 13. Contour with wheel profile in the shape of a circular arc.

The main advantage of the cogwheel reducer is the simple design and production of large-sized cogwheel, and the disadvantage is the low accuracy. cogwheel reducers are mainly used as multiplier gears. In addition, cogwheel gears are used in planetary gearboxes with large ratios, as well as in intermediate drives of chain conveyors in the mining industry, in various counters and other mechanisms.

#### 1.4. Patent survey

The gearing consists of an output moving wheel pos. 1 and pinion pos. 2, the outer contour of which is designed with  $n$  half-cylindrical notches with possibility of meshing with  $n+1$  half-cylindrical notches on the inner contour of the output moving wheel pos. 1. The radius of semi-cylindrical notches and tooth projections is the same and equal to eccentricity value  $e/2$ , and faces of semi-cylindrical notches of outer contour of pinion pos. 2 are made with chamfers, whose length is equal to eccentricity value  $0,7e$ .

The suggested solution has been used in a wave kinematic gearbox, containing moving wheel pos. 1, pinion pos. 2, input eccentric shaft pos. 3, pins pos. 4, eccentrics pos. 5, supports pos. 6. Pinion pos. 2 is mounted on eccentric shafts pos. 5 and eccentrics of input eccentric shaft pos. 3. Pins pos. 4 and eccentrics pos. 5 are installed in the support holes of support item 6. 6. Through the through-holes in pinion pos. 1 and supports pos. 6 the pins pos. 4 and eccentrics pos. 5. The eccentricity of the input eccentric shaft pos. 3 and the eccentric shafts are equal to the centre distance  $e$  of mobile wheel pos. 1 and pinion pos. 2.

The wave kinematic gearbox with the suggested gearing works as described below. The rotation of the input eccentric shaft pos. 3 drives the pinion pos. 2, which runs over the pins of pos. 4. Eccentrics pos. 5 rotate in relation to the hole axis of support pos. 6. The pinion acquires two motions: translational and rotational, transmitting this complex motion, the semi-cylindrical protrusions of gear teeth pos. 2 are engaged with the semi-cylindrical notches of the output moving wheel pos. 1. The output drive wheel pos. 1 is run in on support bearings.

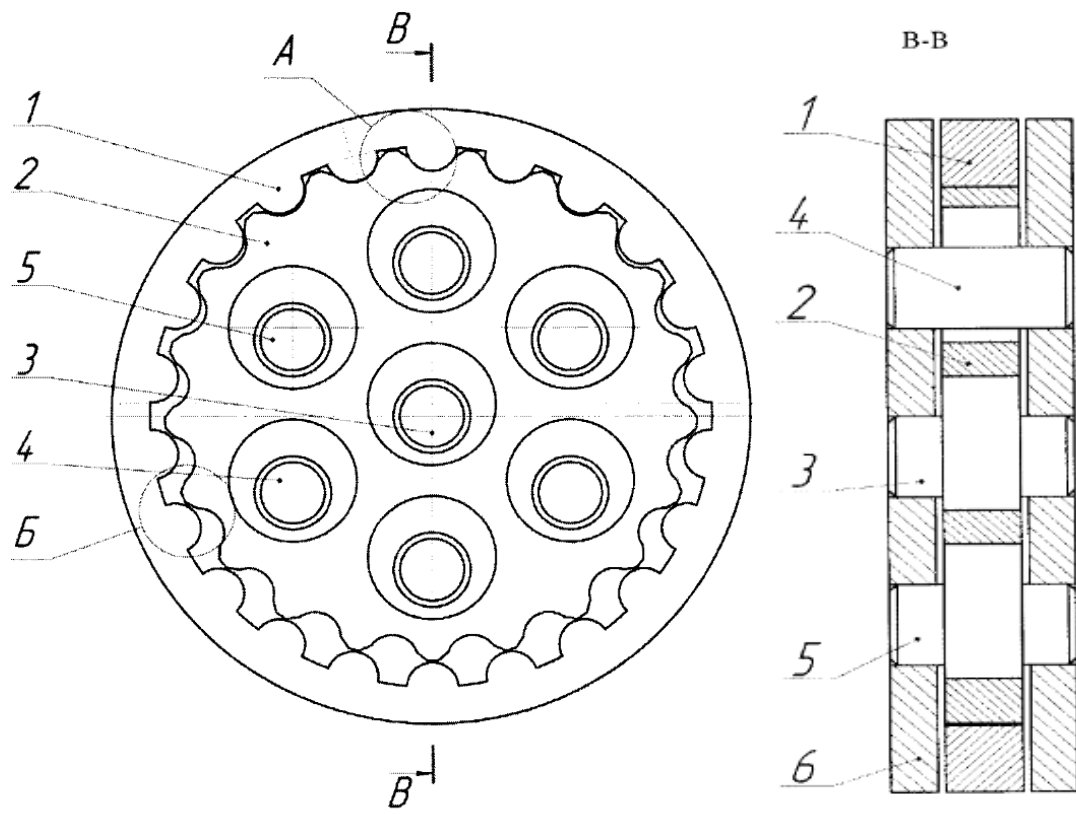


Fig. 14. Wave transmission.