

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

Инженерная Школа новых производственных технологий
Направление подготовки 15.04.01 «Машиностроение»
Отделение материаловедения школы (НОЦ)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Трёхмерное моделирование червячных колёс для обработки на станках с ЧПУ
УДК 621.833.383:004.925.84:621.9.06-529

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ61	Ларионова Людмила Владимировна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Ким А.Б.			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Хаперская А.В.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Ю.М.	д.т.н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
15.04.01 «Машиностроение»	Арляпов А.Ю.	к.т.н.		

Планируемые результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
P1	Способность выбирать аналитические и численные методы при разработке математических моделей машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов в машиностроении
P2	Способность подготавливать технические задания на разработку проектных решений, разрабатывать эскизные, технические и рабочие проекты технических разработок с использованием средств автоматизации проектирования и передового опыта разработки конкурентоспособных изделий, участвовать в рассмотрении различной технической документации, подготавливать необходимые обзоры, отзывы, заключения
P3	Способность изучать и анализировать необходимую информацию, технические данные, показатели и результаты работы, систематизировать их и обобщать
P5	Способность получать и обрабатывать информацию из различных источников с использованием современных информационных технологий, уметь применять прикладные программные средства при решении практических вопросов с использованием персональных компьютеров с применением программных средств общего и специального назначения, в том числе в режиме удаленного доступа
Общекультурные компетенции	
P6	Способность выбирать оптимальные решения при создании продукции с учетом требований качества, надежности и стоимости, а также сроков исполнения, безопасности жизнедеятельности и экологической чистоты производства
P7	Способность самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля, для приобретения новых знаний и умений.

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

Инженерная Школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 15.04.01 «Машиностроение»
 Отделение материаловедения школы (НОЦ)

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

_____ Арляпов А.Ю.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ЛМ61	Ларионова Людмила Владимировна

Тема работы:

Трёхмерное моделирование червячных колёс для обработки на станках с ЧПУ	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	20.03.2018, №1973/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.18
--	----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является – червячное колесо</p> <p>Задача: разработать математическую модель червячного колеса, правильно описывающую геометрию боковой поверхности зуба колеса</p>
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы и задачи исследования. 2. Методика проведения исследовательской работы. 3. Результаты исследований. 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 5. Социальная ответственность.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Демонстрационный материал (презентация в MS PowerPoint)</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Исследовательский	Ким А.Б.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Хаперская А.В.
Социальная ответственность	Федорчук Ю.М.
Исследовательский (на англ. яз.)	Пичугова И.Л.

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

Исследовательский раздел

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10.10.16
---	----------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Ким А.Б.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ61	Ларионова Л.В.		

Оглавление

Оглавление.....	4
РЕФЕРАТ.....	7
Введение	9
Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки.....	11
1.1 Общие сведения о геометрии и изготовлении червячных колёс	12
1.1.1 Общие сведения о зубчатом зацеплении	12
1.1.1.1. Базовые понятия эвольвентного зацепления	12
1.1.1.2 Основные сведения о червячном зацеплении	15
1.1.2. Производство червячных колёс.....	18
1.1.2.1 Метод копирования.....	18
1.1.2.2. Метод обкатки.....	20
1.1.2.3. Обработка на станках с ЧПУ	24
1.2. Разработка 3D моделей червячных колёс	25
1.2.1. Методы создания 3-D моделей.....	26
1.2.1.1 Построение с помощью встроенной библиотеки <i>КОМПАС-3D</i>	34
1.2.1.2 Проектирование с помощью базовых формул эвольвентного зацепления.....	39
1.2.1.3. Построение модели червячного колеса в <i>Kompas-3D</i> с помощью производящей рейки.....	44
1.2.1.4. Построение модели червячного колеса в <i>SolidWorks</i> путем имитации процесса зубонарезания методом обката	49
1.2.2 Изготовление червячного колеса методом огибания	55
1.2.3 Измерение на координатно-измерительной машине.....	56

1.2.3.1 Базирование детали	58
1.2.3.2 Последовательность измерения	61
1.3. РЕЗУЛЬТАТ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	63
1.3.1 Сравнение профилей моделей червячных колёс, полученных различными способами.....	63
1.3.2 Сравнение профилей моделей червячных колёс с нарезанным колесом	68
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	73
Введение	74
2.1. Предпроектный анализ.....	75
2.1.1. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	75
2.1.2 FAST-анализ	76
2.1.3 SWOT-анализ	80
2.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации	82
2.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	84
2.2 Инициация проекта.....	85
2.2.1 Цели и результат проекта.....	85
2.2.2 Организационная структура проекта.....	86
2.2.3 Ограничения и допущения проекта	87
2.3. Планирование управления научно-техническим проектом.	87
2.3.1 План проекта	87
2.3.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта	93

2.3.3 Матрица ответственности.....	100
2.3.4 Оценка экономической эффективности проекта.....	101
2.3.5 Оценка научно-технического уровня НИР.....	101
2.3.6 Реестр риска проектов.....	103
2.4. Оценка сравнительной эффективности исследования.....	104
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ».....	107
Введение	109
3.1 Анализ вредных и опасных факторов.....	109
3.2 Микроклимат.....	111
3.3 Вредные вещества.....	112
3.4 Производственный шум.....	113
3.5 Освещение.....	115
3.6 Электробезопасность.....	118
3.7 Пожаровзрывобезопасность.....	118
3.8 Экологичность.....	120
3.9 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	121
Законодательные акты.....	122
Графические материалы.....	123
Заключение.....	124
Список используемых источников.....	125
Приложение А.....	127
Приложение Б.....	143
Приложение В.....	145

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 130 листов, 57 рисунков, 17 источников, 3 приложений.

Ключевые слова: зубчатое зацепление, червячное колесо, станок с ЧПУ, математическая модель.

Актуальность работы состоит в возможности изготовления червячных колёс на станках с ЧПУ. Это позволит исключить затраты на проектирование и производство специального инструмента – червячной фрезы, повысить производительность, снизить себестоимость колеса.

Объектом исследования является червячное колесо.

Цель работы состоит в упрощении производства червячных колёс посредством использования станков с ЧПУ. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- предложить несколько способов разработки модели червячного колеса;
- изготовить червячное колесо на универсальном зубофрезерном станке червячной фрезой;
- сравнить разработанные модели колеса с реальным колесом;
- проанализировать отклонения, сделать вывод о пригодности моделей для изготовления червячного колеса на станке с ЧПУ.

Работа представлена введением, тремя разделами и заключением.

В первом разделе «Общие сведения о геометрии и производстве червячных колёс» рассмотрены базовые понятия эвольвентного зацепления, даны сведения о червячном зацеплении, рассмотрены методы производства червячных колёс

Во втором разделе «Разработка 3D моделей червячных колёс» рассмотрено программное обеспечения для проектирования зубчатых зацеплений и червячных в частности. Построено 4 модели червячного колеса

различными методами. Нарезано червячное колесо и проведены измерения на координатно-измерительной машине.

В третьем разделе «Результат исследования» проанализированы разработанные модели червячных колёс. Рассмотрены результаты сравнения моделей червячных колёс с реальным колесом.

В заключении изложены выводы о проделанной работе и определены дальнейшие пути развития.

Введение

Зубчатые передачи занимают важное место не только в машиностроении, но и в других сферах человеческой деятельности.

Анализ существующих программных продуктов, позволяющих проектировать, оптимизировать параметры зубчатого зацепления показал, что данные программы не обеспечивают связь математической модели изготавливаемого колеса с управляющей программой станка, не распространяются на производство червячных колёс.

Сложность производства червячных колёс в том, что червячная фреза, которую используют для нарезания, по своим параметрам должна соответствовать червяку, который находится в зацеплении с колесом. То есть червячная фреза – специальный инструмент и для каждого колеса проектируется отдельно. Это очень сильно удорожает производство, так как стоимость разработки и изготовления инструмента включается в конечную стоимость червячного колеса.

В единичном и мелкосерийном производстве для снижения производственных затрат используется малопроизводительный метод фрезерования резцом-летучкой. Этот метод характеризуется низким качеством поверхности зубьев в связи с низкой жёсткостью и повышенным износом режущей кромки резца.

В связи с этим разработка 3D-модели червячного колеса, которая правильно описывает геометрию червяного колеса приобретает особую актуальность. Использование станков с ЧПУ для производства червячных колёс позволит снизить затраты, повысить эффективность, обеспечить точность нарезаемых колёс.

Объектом исследования является червячное колесо. Предметом – математическая модель червячного колеса, правильно описывающая профиль зуба.

Разработано четыре модели червячного колеса, из которых одно принято для дальнейшей работы.

Способ построения математической модели будет необходим предприятиям, изготавливающим червячные колёса. Особое внимание следует уделить предприятиям, работающим в мелкосерийном и единичном производстве, так как данный способ позволит им существенно сократить затраты на производство.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

3D-модель – виртуальная объемная геометрическая модель объекта, представляющая собой совокупность поверхностей, размещенных в трехмерном координатном пространстве.

CAD-программа – программное обеспечение, автоматизирующее труд инженера-конструктора и позволяющее решать задачи проектирования изделий и оформления технической документации при помощи персонального компьютера.

Эскиз – применительно к CAD-программам – базовый элемент, задающий форму и размеры трёхмерной модели

Зубчатое зацепление – передача движения между зубчатми колёсами либо зубчатым колесом и рейкой

Модуль (модуль зуба) – условная величина, имеющая размерность в миллиметрах, используется как масштабная характеристика зубчатого колеса

Эвольвента – кривая с переменным радиусом кривизны, образованная некоторой точкой на прямой, обкатывающейся без скольжения по окружности называемой основной.

ЧПУ (Числовое программное управление) – компьютеризированная система управления, управляющая приводами технологического оборудования.

Зубонарезание – процесс обработки зубчатых колёс, и деталей, имеющих зубья, с целью формирования профиля зуба

Профиль зуба – линия пересечения боковой поверхности зуба с заданной плоскостью

1.1 Общие сведения о геометрии и изготовлении червячных колёс

1.1.1 Общие сведения о зубчатом зацеплении

1.1.1.1. Базовые понятия эвольвентного зацепления

Зубчатые передачи служат для передачи или преобразования равномерного либо неравномерного, что встречается реже, вращательного движения между валами с параллельными, пересекающимися, скрещивающимися осями. Из существующих видов зацепления – циклоидального, часового, цевочного, эвольвентного, зацепления Новикова, – наиболее распространено эвольвентное зацепление.

Профиль боковых сторон зубьев зубчатых колёс с эвольвентным зацеплением представляет собой две эвольвенты, расположенные симметрично. Эвольвента – кривая с переменным радиусом кривизны, образованная некоторой точкой на прямой, обкатывающейся без скольжения по окружности называемой основной. Её диаметр (радиус) обозначается с индексом b : $d_b(r_b)$.

На рисунке 1. показано зацепление двух прямозубых цилиндрических зубчатых колёс с эвольвентным профилем. Колесо с большим числом зубьев z_2 , называется колесом, с меньшим числом зубьев z_1 – шестернёй. Центры шестерни и колеса находятся в точках O_1 и O_2 соответственно. В процессе обката шестерни с колесом происходит качение без скольжения двух центроид – окружностей, соприкасающихся в полюсе зацепления P . Эти окружности называются начальными, а их диаметры (радиусы) обозначаются с индексом w : $d_{w1}(r_{w1})$, $d_{w2}(r_{w2})$.

Делительная окружность – окружность, проходящая через точку эвольвенты с профильным углом $\alpha = 20^\circ$. Диаметр делительной окружности находят по формуле $d = mz$, обозначается $d_1(r_1)$ для шестерни, $d_2(r_2)$ для колеса. У некорригированных колёс делительные и начальные окружности совпадают.

Модуль зуба $m = \frac{P}{\pi}$ – условная величина, имеющая размерность в миллиметрах, используется как масштабная характеристика зубчатого колеса.

Шаг $P = \pi m$ – расстояние между двумя соседними одноимёнными сторонами профиля.

Основная окружность – окружность, от которой образуется эвольвента. Параметры, относящиеся к этой окружности обозначаются с индексом b : $d_{b1}(r_{b1}), d_{b2}(r_{b2})$.

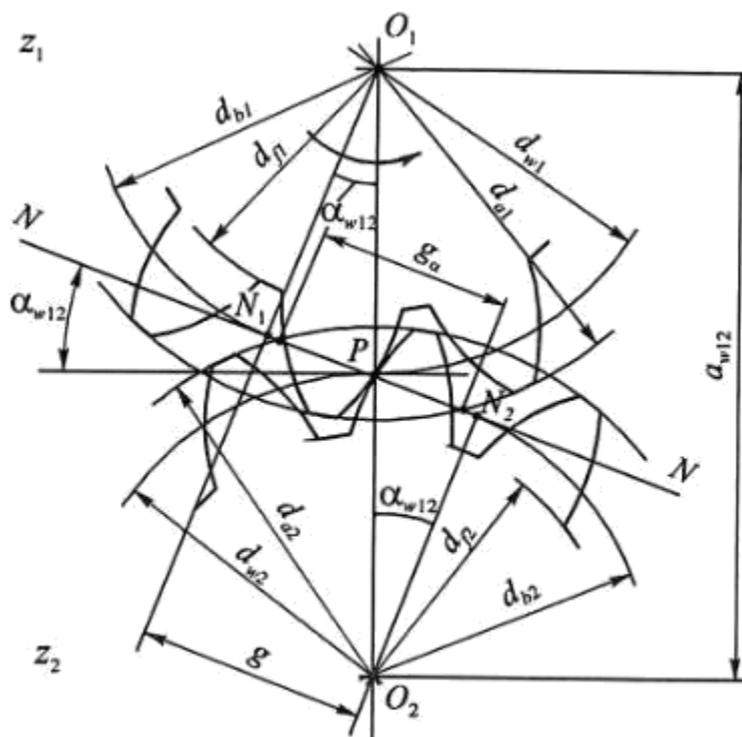


Рисунок 1. Эвольвентное зацепление зубчатых колёс

Касательно к основным окружностям через полюс зацепления проходит прямая $N-N$, а её участок $N_1 - N_2$ называется линией зацепления. $N_1 - N_2$ называется теоретической линией зацепления, обозначаемой буквой g . Расстояние между точками пересечения её с окружностями выступов колёс называется рабочим участком линии зацепления, обозначается g_a .

Угол между линией зацепления и перпендикуляром к линии, соединяющей центры сопрягаемых колёс, называется углом зацепления α_{w12} . Для некорригированных колёс $\alpha_{w12} = \alpha_0$.

Межцентровое расстояние a_{w12} – расстояние между центрами сопрягаемых колёс.

Окружности выступов и впадин – окружности, проходящие через вершины и впадины зубьев колёс соответственно. Диаметры (радиусы) обозначаются $d_{a1}(r_{a1}), d_{f1}(r_{f1})$.

Шаги зубьев колёс – P_t, P_b, P_n, P_x – расстояния между одноимёнными сторонами профиля, замеренные:

- по дуге делительной окружности в торцовом сечении – окружной (торцовой) шаг $P_t = \frac{\pi d}{z}$;
- по дуге основной окружности – основной шаг $P_b = \frac{\pi d_b}{z}$;
- по линии зацепления – основной нормальный шаг P_{bn} ;
- по нормали к направлению зубьев и по оси (у винтовых передач) – нормальный шаг P_n и осевой шаг P_x [6, стр 291].

Коэффициент перекрытия ε – отношение активной (рабочей) части линии зацепления к основному нормальному шагу:

$$\varepsilon = \frac{g_a}{P_{bn}}$$

Окружная (торцовая) толщина зуба S_t – длина дуги делительной окружности, заключённая между двумя сторонами зуба.

Окружная ширина впадины между зубьями e – расстояние между разноимёнными сторонами профиля по дуге делительной окружности.

Высота головки зуба h_a – расстояние между окружностями выступов и делительной.

Высота ножки зуба h_f – расстояние между делительной окружностью и окружностью впадин.

Рабочий участок профиля зуба – геометрическое место точек контакта профилей сопрягаемых колёс, определяется как расстояние от вершины зуба до точки начала эвольвенты.

Переходная кривая профиля зуба – часть профиля от начала эвольвенты, то есть от основной окружности до окружности впадин.

1.1.1.2 Основные сведения о червячном зацеплении

Червячная передача – механизм передачи вращения между валами посредством зацепления червячного колеса и червяка. Наиболее часто геометрические оси валов скрещиваются под углом 90° . Существует два вида червячных передач – с цилиндрическим и глобоидным червяком (рисунок.2) Делительной и начальной поверхностью первого вида червяков является цилиндр. Делительная поверхность глобоидного червяка образована вращением вогнутого участка дуги делительной окружности червячного колеса, находящегося в зацеплении, вокруг оси червяка.

Глобоидная червячная передача позволяет передавать высокий крутящий момент за счёт взаимно охватывающей формы червяка и колеса, в контакте находится большее число зубьев колеса, чем в аналогичной передаче с цилиндрическим червяком. Однако эти передачи сложнее в изготовлении, сборке и регулировке, имеют сравнительно низкий КПД и больший процент заеданий, быстрее изнашиваются. Поэтому в машиностроении более распространена цилиндрическая червячная передача.

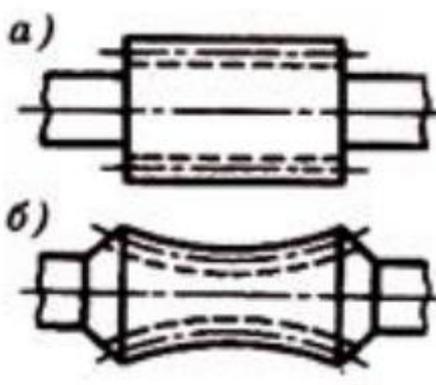


Рисунок 2. а) цилиндрический червяк; б) глобоидный червяк

По расположению червяка относительно колеса червячные передачи разделяют на передачи с верхним, нижним, боковым расположением. Выбор вида расположения зависит от окружной скорости червяка, способа

смазывания, рациональности компоновки. Передачи с верхним и нижним расположением червяка применяются наиболее часто.

Червяки выполняются с линейчатыми и нелинейчатыми поверхностями витков. Наиболее распространены следующие виды линейчатых червяков: архимедов (ZA), эвольвентный (ZI), конволютный (ZN1, ZN2) [3, стр 93]

Архимедов червяк (ZA) (рисунок 3, а) — образуется при нарезании его витков резцом, вершина которого установлена по оси заготовки. В торцовом сечении такого червяка получим Архимедову спираль. Архимедовы червяки широко распространены, так как наиболее просты в изготовлении и обеспечивают достаточно высокую точность червячной передачи.

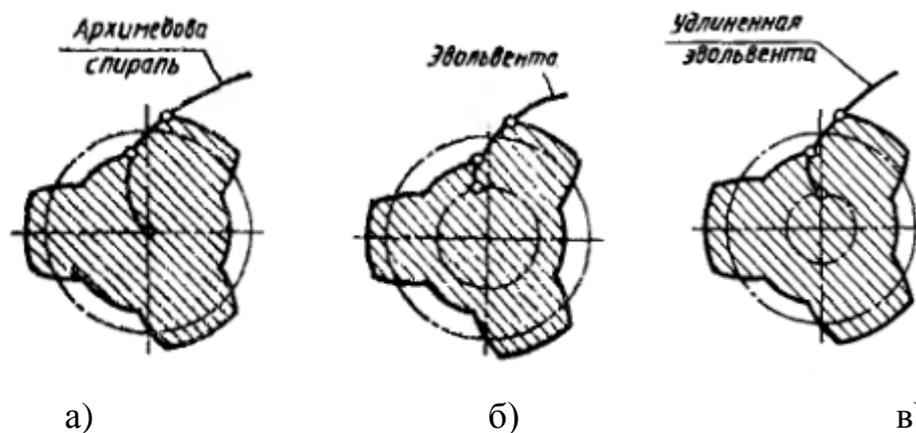


Рисунок 3. Теоретические торцовые профили червяков: а) Архимедов червяк; б) эвольвентный червяк; в) конволютный червяк

Эвольвентный червяк (ZI) (рисунок 3, б); можно рассматривать как косозубое цилиндрическое колесо с очень большим углом наклона зуба к образующей цилиндра и с малым числом зубьев. Профиль витков зубьев очерчен эвольвентой.

Конволютный червяк (ZN1 или ZN2) - образуется при нарезании его витков резцом, главная режущая кромка которого устанавливается перпендикулярно направлению впадины или витков червяка (рис.3, в). В поперечном сечении червяка получим конволюту (удлиненная, или укороченная эвольвента), а в сечении плоскостью, номинальной к направлению

впадины или витков – прямые линии, которые являются образующими боковых сторон профиля витков в этом сечении. Боковая поверхность витков такого червяка представляет собой конволютную винтовую поверхность [2].

Из цилиндрических червяков в машиностроении наиболее распространены архимедовы червяки, как наиболее простые в изготовлении.

Для облегания тела червяка венец червячного колеса имеет зубья дугообразной формы, что увеличивает длину контактных линий в зоне зацепления.

Основные геометрические параметры червячного колеса представлены на рисунке 4:

- Диаметр делительной окружности червячного колеса d_2 ;
- Диаметр впадин червячного колеса d_{f2} ;
- Диаметр вершин червячного колеса d_{a2} ;
- Наибольший диаметр червячного колеса d_{aM2} ;
- Ширина венца червячного колеса b_2 ;
- Радиус выемки поверхности вершин зубьев червячного колеса R_a ;
- Радиус выемки поверхности впадин зубьев червячного колеса R_f .

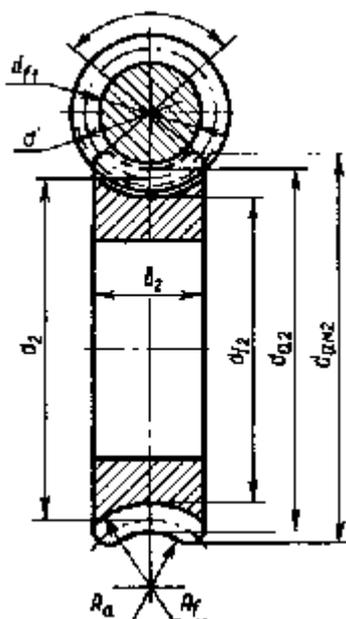


Рисунок 4. Основные геометрические параметры червячной передачи

Формулы для расчёта основных геометрических параметров червяка и червячного колеса указаны ниже.

Таблица 1 – Формулы для расчёта основных параметров червячного зацепления

Диаметр делительной окружности червяка	d_1	$m \cdot q$
Диаметр вершин червяка	d_{a1}	$d_1 + 2m$
Высота головки витков для архимедова червяка	h_{a1}	$m h_{a1}$
Высота ножки витков	h_{f1}	для архимедова и конволютного червяка $h_{f1} = 1.2m$, для эвольвентного $h_{f1} = (2,2\cos\gamma - 1)m$
Диаметр впадин червяка	d_{f1}	$d_1 - 2h_{f1}$
Расчётный ход червяка	P	πm
Угол подъёма витков червяка	γ	$\arctg\left(\frac{z_1}{q}\right)$
Длина нарезанной части червяка	b_1	$2 \sqrt{\left(\frac{d_{aM2}}{2}\right)^2 - \left(a_w - \frac{d_{a1}}{2}\right)^2} + \frac{\pi m}{2}$
Смещение червяка	x	$x = \frac{a_w}{m} - \frac{q + z_2}{2}$
Диаметр делительной окружности червячного колеса	d_2	$m \cdot z_2$
Диаметр вершин червячного колеса	d_{a2}	$d_2 + 2m(1 + x)$
Диаметр впадин червячного колеса	d_{f2}	$d_2 - 2m(1.2 + x)$
Наибольший диаметр червячного колеса	d_{aM2}	$\leq d_{a2} + \frac{6m}{z_1 + 2}$
Ширина венца червячного колеса	b_2	при $z_1 \leq 3$ $b_2 \leq 0.75d_{a1}$, при $z_1 \leq 3 = 4$ $b_2 \leq 0.67d_{a1}$
Радиус выемки поверхности вершин зубьев червячного колеса	R_a	$0.5d_1 - m$
Межосевое расстояние	a_w	$0.5m(q + z_2 + 2x)$

1.1.2. Производство червячных колёс

1.1.2.1 Метод копирования

Нарезание червячных колёс возможно методом копирования дисковыми фрезами. Фрезерование производится на универсально-фрезерных станках с использованием делительной головки с радиальной подачей. Минусом данного

способа являются подрезания вершин зубьев δ_1 и δ_{11} , возрастающие с увеличением угла подъёма винтовой линии витков червяка и разницей между диаметрами модульной фрезы и червяка нарезаемой передачи (рисунок 7). Поэтому данный способ обработки не рекомендуется для червячных колёс с углом подъёма более $6\text{—}8^\circ$.

Методом копирования выполняют только предварительное нарезание. Для чистового нарезания используют червячные фрезы, параметры которых совпадают с параметрами находящегося в зацеплении с колесом червяка. Такой способ нарезания используется только в отсутствие зуборезных станков, так как имеет низкую производительность [9].

Нарезание производится следующим образом: дисковая модульная фреза с диаметром, равным диаметру цилиндра выступов червяка или же несколько меньшим устанавливается с использованием оправки в шпиндель станка так, чтобы она находилась примерно на середине станка в его среднем положении на поперечных направляющих. Червячное колесо закрепляется на шпинделе универсальной делительной головки, стол станка поворачивается на угол подъёма винтовой линии червяка. При этом необходимо учитывать направление червяка, находящегося в зацеплении с нарезаемым колесом. Если колесо будет сцепляться с левым червяком, стол нужно повернуть по часовой стрелке, если же с правым – против. Червячное колесо необходимо установить в положение, в котором ось фрезы пересекает ось червячного колеса в плоскости его симметрии, фреза вершиной нижнего зуба касается точки *a* (рисунок 5). Глубина фрезерования назначается в зависимости от межосевого расстояния червячной передачи с учётом припуска на окончательную обработку [8, стр 233]. После завершения фрезерования впадины стол станка опускается до окончательного выхода фрезы из впадины. Заготовка поворачивается на один зуб с помощью делительной головки, производится фрезерование следующей впадины между зубьями.

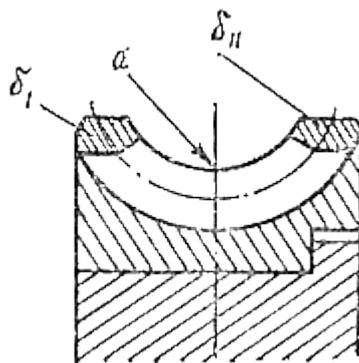


Рисунок 5. Подрезание зубьев червячного колеса

Для окончательной обработки стол станка необходимо вернуть в обычное положение. Заготовку следует установить так, чтобы витки фрезы и профрезерованные впадины колеса совпали. Затем включают шпиндель на низкой частоте вращения. Чистовое нарезание производят методом обкатки с радиальной подачей снизу вверх. Частоту вращения шпинделя увеличивают только после того, как убедились в равномерности вращения заготовки и её удовлетворительном зацеплении с фрезой. После этого с помощью вертикальной подачи, осуществляемой вручную, удаляют оставленный припуск. По достижению расчётного значения межосевого расстояния производят работу без подачи. Это необходимо, чтобы устранить вызванные упругими отжатыми отклонения обработки.

1.1.2.2. Метод обкатки

Зубья червячных колёс нарезают на универсальных зубофрезерных станках методом обкатки и специально предназначенных для этой цели мастер-станках. Существуют два способа зубонарезания червячных колёс:

- 1) червячными фрезами;
- 2) резцами-летучками или многозубыми резцами при тангенциальной подаче.

В обоих случаях режущие кромки инструмента воспроизводят движения червяка, который находится в зацеплении с нарезаемым червячным колесом, как в уже работающей передаче.

Существует три метода нарезания червячными фрезами: с радиальной, с тангенциальной, с радиально-тангенциальной подачами.

При использовании метода с радиальной подачей (рис. 6, а) ось фрезы устанавливают горизонтально и симметрично оси колеса. Нарезание производят при постепенном уменьшении станочного межосевого расстояния. Фреза 1 подаётся радиально на глубину зуба.

Как правило, при радиальной подаче боковые поверхности зубьев приобретают огранку. Число граней равно числу режущих зубьев фрезы на длине нормального шага червяка. Параметр шероховатости зависит от числа зубьев фрезы, числа заходов фрезы, диаметра колеса. Для уменьшения шероховатости рекомендуется провести чистовую обработку с тангенциальной подачей.

Для обеспечения нарезания зубьев колеса по всей окружности, перед остановкой станка и после выключения радиальной подачи следует совершить полный оборот детали. Чтобы не повредить профиль зуба нарезанного колеса, необходимо вывести фрезу из зацепления с колесом до завершения работы станка

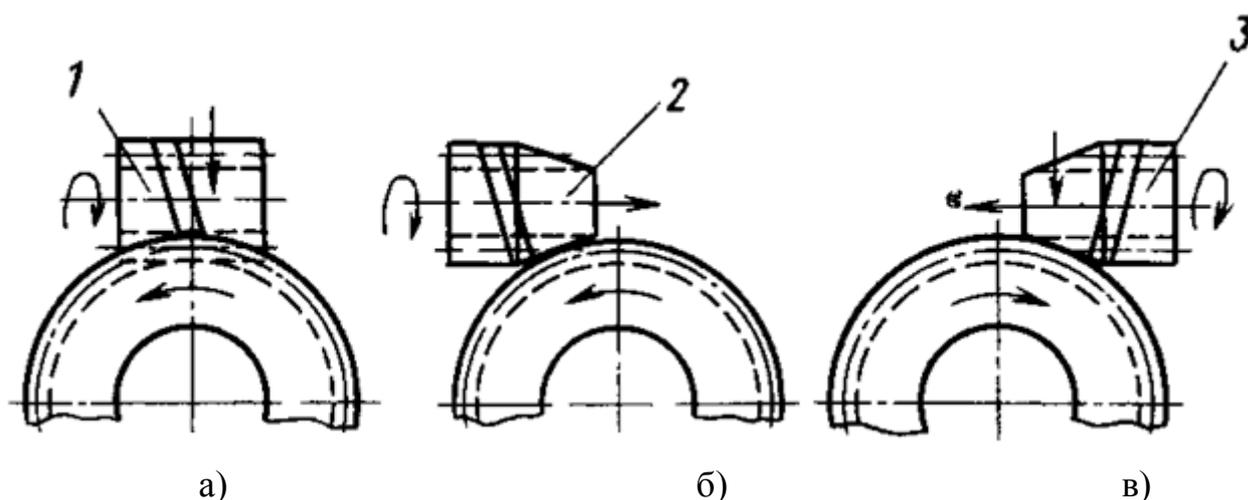


Рисунок 6. Схемы нарезания червячного колеса червячной фрезой

Достоинством данного метода является высокая производительность, его применяют в серийном и в массовом производствах. Позволяет нарезать

колёса 8-ой степени точности. [8] Применяют при нарезании колёс с углом подъёма винтовой линии червяка до 8° . В червячных передачах, в которых колёса нарезаны методом радиальной подачи крайне сложно достигнуть требуемой точности по нормам контакта. Эти передачи часто заедают, им необходима продолжительная приработка.

При использовании метода с тангенциальной подачей нарезание происходит при неизменном межосевом расстоянии, фреза перемещается вдоль оси [10, стр. 68]. Для нарезания данным способом необходим станок с протяжным суппортом, чтобы задать осевую подачу инструменту. Используется фреза с заборным конусом (рисунок 7) – это необходимо, чтобы уменьшить нагрузку на режущие зубья и распределить износ. За заборной конической частью следует цилиндрическая часть, которая производит чистовую обработку зубьев.

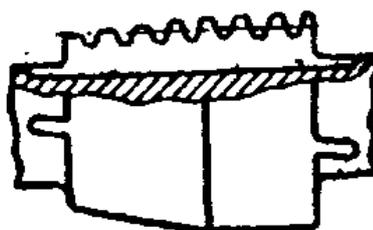


Рисунок 7. Червячная фреза с заборным конусом

Перед началом обработки необходимо установить фрезу так, чтобы заборный конус касался окружностей выступов колеса (рисунок 6, б). Процесс зубонарезания начинается, когда заборная часть инструмента внедряется в тело заготовки; заканчивается при выходе первого калибрующего зуба из зацепления с колесом. Если обработка ведётся за один ход, для установки инструмента используется номинальное межосевое расстояние червячной передачи. В случае, когда обработку производят за два хода, то есть необходимо обеспечить припуск под чистовую обработку, межосевое расстояние увеличивают.

Из-за того, что при использовании метода радиальной подачи возможен срез рабочих участков поверхностей зубьев, метод тангенциальной подачи

является предпочтительным. При использовании осевой подачи инструмента с небольшим количеством режущих зубьев возможна огранка боковых поверхностей зубьев колёс. Однако она зависит от осевой подачи инструмента на оборот и, как правило, почти не заметна. Метод тангенциальной подачи обеспечивает более высокую точность профиля, она обуславливается величиной подачи.

При использовании метода с радиально-тангенциальной подачей (рисунок 6, в) заборный конус фрезы врезается в заготовку на радиальной подаче. По достижению номинального межосевого расстояния между фрезой 3 и колесом начинается чистовая обработка. Калибрующая поверхность фрезы срезает наименьший припуск с боковой поверхности зуба. В случае, когда требуется обеспечить припуск для чистовой обработки, радиальную подачу выключают до достижения полной высоты зуба. При нарезании данным методом возможно применение цилиндрических фрез такой же длины, как и при обработке с радиальной подачей. Достоинствами метода с радиально-тангенциальной подачей является высокая производительность – он производительнее метода с радиальной подачей. Так же данный метод позволяет обеспечить более точный профиль зуба, по сравнению с методом тангенциальной подачи

В единичном производстве невыгодно использование червячных фрез. Как правило, зубонарезание производят фрезой-летучкой. Если необходимо нарезать червячное колесо высокой точности, либо крупномодульное колесо, в оправке закрепляют несколько резцов. При этом часть резцов предназначена для черновой обработки – резцы 1,2 (рисунок 8), часть для чистовой – резец 3. Фрезу-летучку используют только при тангенциальной подаче. Процесс нарезания очень длительный и с низким периодом стойкости.

Метод обработки червячного колеса выбирают исходя из требований к качеству зацепления червячной передачи. Передачи повышенной точности либо с большими углами подъёма червяка изготавливают червячными фрезами

с заборным конусом, фрезой-летучкой при использовании тангенциальной подачи. При использовании метода с радиальной подачей для червячных колёс с углом подъёма линии зуба больше 8° перед достижением номинального межосевого расстояния срезается металл с профиля зубьев колеса. Данный участок профиля зуба в работе передачи не участвует. Вследствие этой причины и с целью лучшего формообразования зубьев червячного колеса метод с тангенциальной подачей используется и для колёс с углом подъёма меньше 8° .

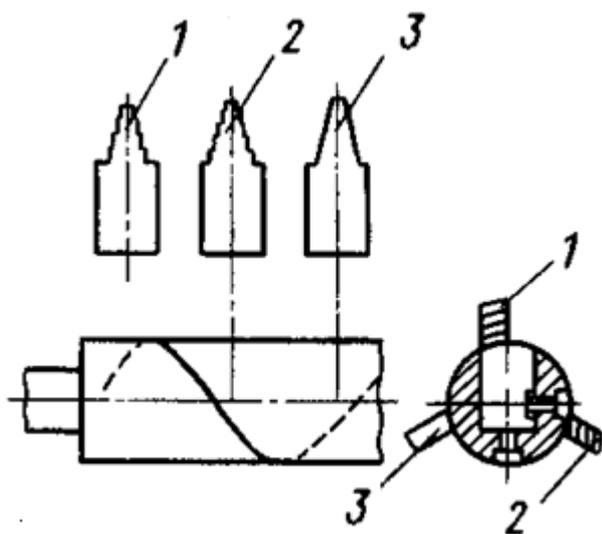


Рисунок 8. Нарезание фрезой-летучкой

1.1.2.3. Обработка на станках с ЧПУ

Возможно нарезание червячных колёс на станках с ЧПУ пальцевой фрезой. Для этого необходимо создать 3D-модель колеса. Оптимальным способом создания 3D-модели является имитация зацепления передачи, так как в этом случае достигается наилучшая форма профиля зуба. По имеющейся 3D-модели создается управляющая программа. Важно правильно подобрать инструмент, исходя из наименьшего радиуса впадин нарезаемого колеса. Таким методом нарезали крупномодульные колёса в [5]. При нарезании червячных колёс данным методом возможно оптимизировать пятно контакта и решить некоторые другие задачи – улучшить геометрические, кинематические,

прочностные характеристики зацепления. Так же решается задача снижения трудоёмкости, себестоимости. Меньше времени затрачивается на производство.

В существующих станках с ЧПУ нарезание венца червячного колеса производится в два этапа: предварительное и чистовое. Предварительно нарезают зубья методом копирования дисковой фрезой; Этот метод был описан выше. Окончательно зубья нарезают червячной фрезой. Использование пятиосевых станков позволяет значительно улучшить качество обработки колеса. Также лучшей точности позволяет достичь отсутствие переустановов, необходимых для обработки ступицы колеса и радиуса выемки зубьев. Преимуществом станков с числовым программным управлением является их высокая гибкость, что позволяет нарезать колёса разных размеров и модулей с минимальными затратами времени на переналадку.

1.2. Разработка 3D моделей червячных колёс

В выпускной квалификационной работе будут проведены следующие исследования:

- будут проанализированы существующие программы для создания моделей зубчатых колёс;
- по принятым параметрам будет построено червячное колесо в программных продуктах, имеющих бесплатную версию;
- будут разработаны 3-D модели червячного колеса
- будет изготовлено червячное колесо методом огибания;
- на координатно-измерительной машине будет проведено измерение профиля зубьев колеса, нарезанного червячной фрезой;
- будет проведено сравнение профилей червячного колеса, полученных разными методами и вывод о пригодности профиля для использования при изготовлении червячных колес на станках с ЧПУ.

Для построения 3D-моделей червячных колес в различных программных продуктах заданы следующие исходные данные червячного зацепления:

- модуль $m=2$ мм

- число витков червяка $z_1=1$
- число зубьев колеса $z_2=40$
- коэффициент диаметра червяка $q=20$,
- смещение исходного контура $x=0$.

1.2.1. Методы создания 3-D моделей

Проектирование червячного колеса будет осуществляться следующими методами: с помощью встроенной библиотеки КОМПАС-3D, с помощью базовых формул эвольвентного зацепления, имитацией метода обката вычитанием сечений и вычитанием тела червяка. Принятые начальные значения для всех методов следующие:

- модуль $m=2$ мм;
- число витков червяка $z_1=1$;
- число зубьев колеса $z_2=90$;
- коэффициент диаметра червяка $q=15,5$;
- смещение исходного контура $x=0$.

Для построения необходимо рассчитать геометрические параметры червяка и червячного колеса:

- диаметр делительной окружности червяка $d_1 = m \cdot q = 2 \cdot 15,5 = 31$ мм;
- диаметр вершин червяка $d_{a1} = d_1 + 2m = 31 + 2 \cdot 2 = 35$ мм;
- высота головки витков для архимедова червяка $h_{a1} = m$ $h_{a1} = 2$ мм;
- высота ножки витков для архимедова червяка $h_{f1} = 1,2m = 1,2 \cdot 2 = 2,4$ мм;
- диаметр впадин червяка $d_{f1} = d_1 - 2h_{f1} = 31 - 2 \cdot 2,4 = 26$ мм;
- расчётный ход червяка $P = \pi m = 6,28$ мм;
- угол подъёма витков червяка $\gamma = \arctg\left(\frac{z_1}{q}\right) = \arctg\left(\frac{1}{15,5}\right) = 3^\circ 41' 29''$.

Длина нарезанной части червяка при смещении исходного контура $x = 0$ и числе витков червяка $z_1 = 1$ $b_1 \geq (11 + 0,06z_2)m$. Принимаем $b_1 = 66$ мм.

Рассчитаем геометрические параметры червячного колеса:

- диаметр делительной окружности червячного колеса $d_2 = m \cdot z_2 = 2 \cdot 90 = 180\text{мм}$;
- диаметр вершин червячного колеса $d_{a2} = d_2 + 2m(1 + x) = 180 + 2 \cdot 2 \cdot (1 + 0) = 184\text{мм}$;
- диаметр впадин червячного колеса $d_{f2} = d_2 - 2m(1.2 + x) = 180 - 2 \cdot 2 \cdot 1.2 = 175.2\text{мм}$;
- наибольший диаметр червячного колеса $d_{aM2} \leq d_{a2} + \frac{6m}{z_1+2}$, $d_{aM2} \leq 184 + \frac{6 \cdot 2}{1+2}$. Принимаем $d_{aM2} = 188\text{мм}$;
- ширина венца червячного колеса при $z_1 = 1$ $b_2 \leq 0.75d_{a1}$, $b_2 \leq 0.75 \cdot 35 \leq 26,25$. Принимаем $b_2 = 17,5\text{мм}$;
- радиус выемки поверхности вершин зубьев червячного колеса $R_a = 0.5d_1 - m = 0.5 \cdot 31 - 2 = 13,5\text{мм}$;
- межосевое расстояние $a_w = 0.5m(q + z_2 + 2x) = 0.5 \cdot 2(15,5 + 90 + 2 \cdot 0) = 105,5\text{мм}$.

Рассчитанные параметры червячного зацепления сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Рассчитанные значения параметров червячного зацепления

Параметр	Для червяка	Для колеса
Диаметр делительной окружности, мм	40	80
Диаметр вершин, мм	44	84
Угол подъёма витков червяка γ	$2^\circ 51' 45''$	
Высота головки витков червяка, мм	2	
Высота ножки витков червяка, мм	2,4	
Диаметры впадин, мм	35,2	75,2
Длина нарезанной части червяка, мм	50	
Наибольший диаметр червячного колеса, мм		88
Ширина венца червячного колеса, мм		30

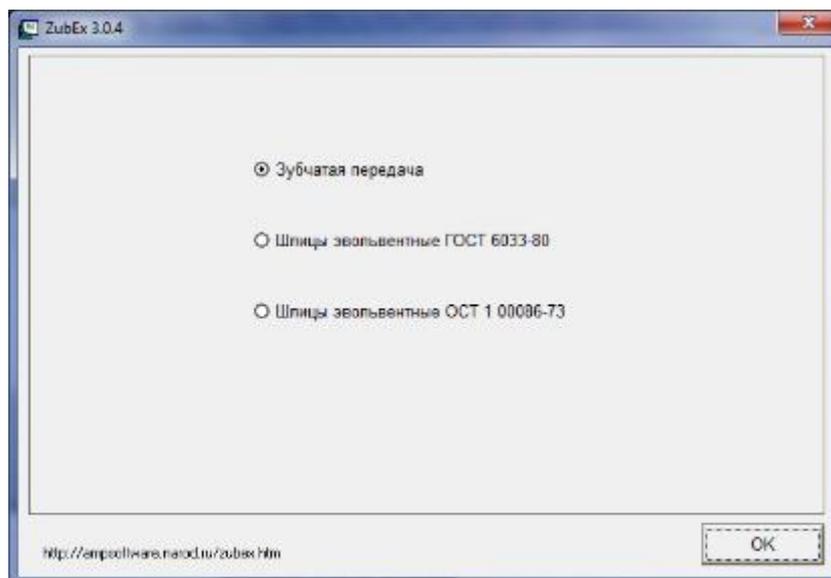
Параметр	Для червяка	Для колеса
Радиус выемки поверхности вершин зубьев червячного колеса, мм		18
Межосевое расстояние, мм	60	

Расчёт проводился согласно [3].

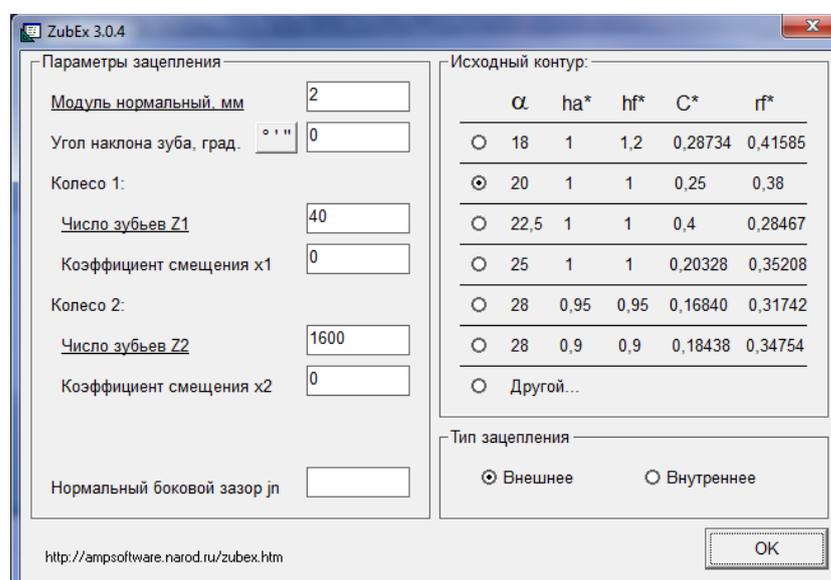
Программы для изготовления зубчатых колёс

В настоящее время разработано множество программ 3D-моделирования, позволяющих смоделировать зубчатое колесо. Условно их можно разделить на программы, в которых генерируется непосредственно зубчатое колесо, и программы, генерирующие профиль зуба по заданным параметрам, который далее необходимо перенести в CAD-программу и самостоятельно создать модель колеса.

Программа ZubEx, разработанная Плушевским А.М. [12], позволяет построить контуры эвольвентных зубчатых колёс внешнего зацепления и эвольвентных шлицевых соединений. Для этого необходимо в первом окне выбрать зацепление, которое нужно построить (рисунок 9, а). В следующем открывшемся окне (рисунок 9, б) ввести параметры зацепления. Также необходимо будет задать точность построения – количество точек эвольвенты и переходной кривой. Контур генерируется в формате DXF, который можно загрузить в любую CAD-программу с последующим построением объёмной модели. На рисунке 10 показаны результаты моделирования в среде ZubEx – цилиндрическое прямозубое зубчатое колесо, модуль $m = 2$. Программа ZubEX соответствует ГОСТам, она доступна – инсталлятор программы выложен на сайте разработчика, он бесплатен. Минусом данной программы является ограниченность – возможно построение только прямозубых и косозубых цилиндрических колёс. В связи с отсутствием возможности генерирования червячных колёс данная программа в дальнейшей работе использоваться не будет.



а)



б)

Рисунок 9. Интерфейс программы ZubEx: а) выбор типа зацепления;
б) параметры зубчатой передачи

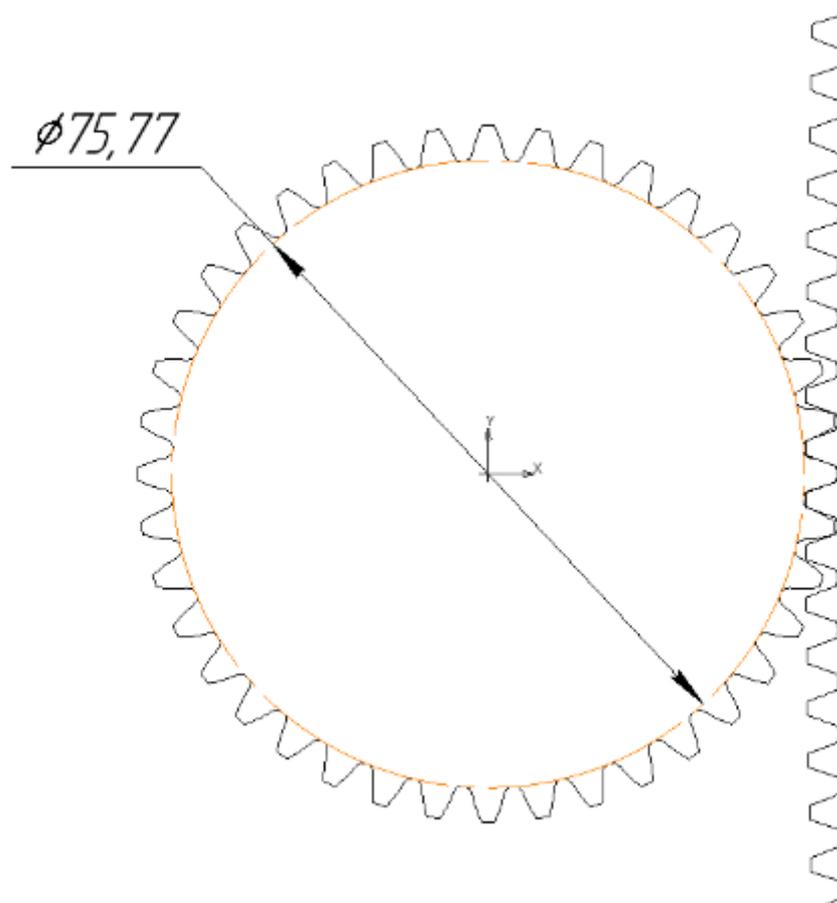


Рисунок 10. Зубчатое зацепление, сгенерированное с помощью ZubEx

Фирма Spiralbevel производит программы для точного трёхмерного моделирования поверхности зуба [13]. Расчёт геометрии зуба производится в Microsoft Excel, затем генерируется поверхность зуба, которая сохраняется в формате iges. Модель колеса можно построить в любой прикладной программе, такой как SolidWorks, Inventor, CATIA, NX, Pro/E, Delcam, Mastercam. Программа Gearotic Motion позволяет рассчитать и построить шестерни, форма которых отлична от цилиндрической. В ней возможно выполнить построение как классической пары цилиндрических шестерён, так и пару колёс нестандартной, но правильной геометрической формы, пару колёс неправильной геометрии, часовой механизм, пару ир цилиндрической шестерни и цевочного колеса. Возможности Gearotic Motion позволяют визуализировать работу смоделированных механизмов, в том числе и трёхмерную [14]. Кроме сохранения видео и чертежей, можно получать готовые управляющие

программы для станков с ЧПУ, в том числе для 4-х координатной обработки. Однако сохранить результаты работы в демоверсии нельзя.

Швейцарская компания KISSsoft AG разработала программное обеспечение KISSsoft. Данный комплекс используется для проектирования, анализа, оптимизации деталей машин, моделирования редукторов, трансмиссий, коробок передач [15]. Программой поддерживаются стандарты DIN, ISO, AGMA. Для всех типов передач – прямозубых и косозубых цилиндрических, конических, гипоидных, червячных, корончатых – возможно выполнить геометрический расчёт, расчёт на прочность, а также форму зуба [16]. Анализ процессов, происходящих в пятне контакта зубчатой передачи, даёт возможность подобрать оптимальную комбинацию коррекций профиля зуба с учетом различных условий нагружения. Для червячных колёс предусмотрен не только расчёт геометрии и прочности, но и допуски на изготовление по стандартам DIN и ISO. Возможно определить КПД, износостойкость, температурную стойкость, стойкость на излом зуба и сопротивляемость изгибу. Учитывается геометрия червяка (ZA, ZE, ZH, ZI, ZK, ZN, ZC). Рассчитанную трёхмерную модель возможно экспортировать в большинство CAD-систем.

В Solidworks существует библиотека стандартных деталей Toolbox, позволяющая сконфигурировать зубчатые колёса. Минусом этого программного продукта является невозможность сгенерировать модель согласно ГОСТам. Для создания модели необходимо в новом документе выбрать библиотеку проектирования ToolBox, стандарт, по которому будет рассчитываться зубчатое колесо, папку Трансмиссия, звёздочки и зубчатые колёса. Выбрать тип колеса. Далее задать исходные параметры. Терминология отличается от принятой согласно ГОСТам (например, монтажное расстояние – межосевое расстояние). В Solidworks отсутствуют червячные колёса и результат моделирования нельзя использовать в производстве, так как профиль зубчатых колёс строится упрощенно – дугами [17]. То есть, созданные 3D-

модели могут быть использованы только для отображения зацеплений при проектировании редукторов.

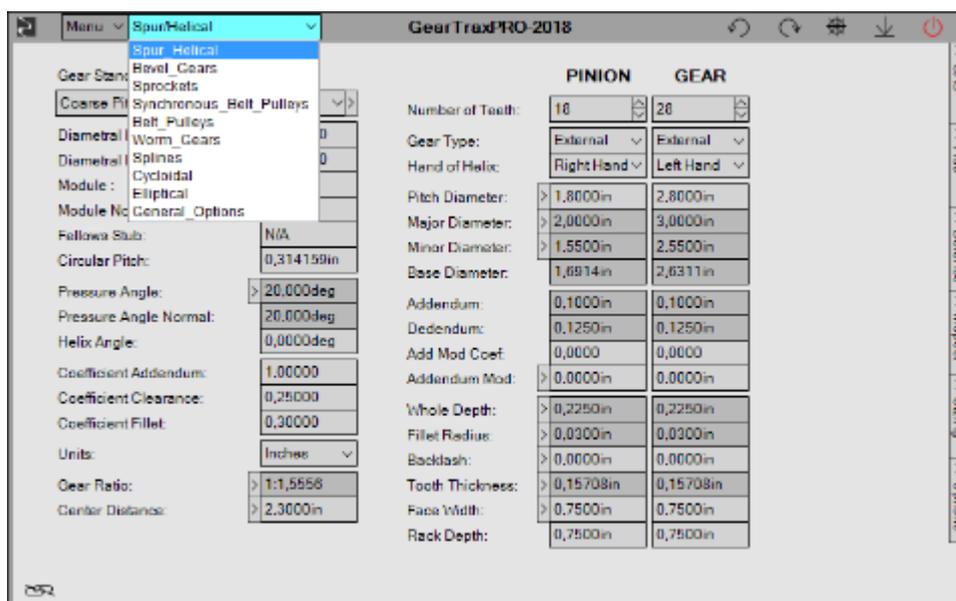


Рисунок 11. Интерфейс приложения GearTrax

В приложении Gear trax можно генерировать цилиндрические прямозубые и косозубые зубчатые колеса, конические зубчатые колеса с прямыми и круговыми зубьями, элементы архимедова червячного колеса, шкивы клиновых и поликлиновых передач, передач с зубчатыми ремнями, звездочки цепных передач, элементы шлицевых соединений с эвольвентными зубьями. Неудобством программы является наличие только английского интерфейса, а также отсутствие ГОСТов.

Для генерации модели необходимо выбрать тип колеса – Worm Gear. В поле Gear standart выбираем Coarse_Pitch_Involute_20deg. В поле Units – Metric. Далее задаём параметры червячной передачи – модуль, шаг витков червяка, число зубьев колеса, число заходов червяка (рисунок 11). Часть параметров Gear trax считает самостоятельно (рисунок 12).

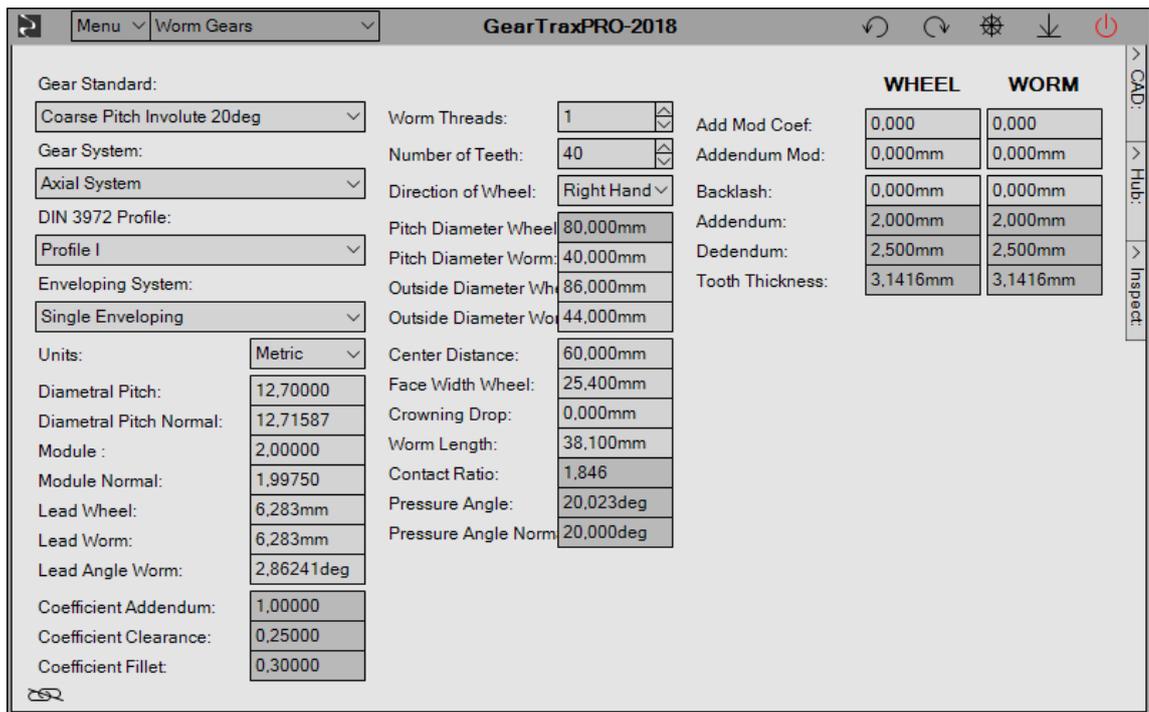


Рисунок 12. Рассчитанные параметры червячной пары

В нижнем поле генерируется создаваемое колесо. Чтобы получить полноценную модель необходимо сохранить файл в одной из САД систем. Для этого выбираем Menu>PRO Tools>Additional CAD Tools>Edit Cad models.

В целом приложение неудобно для российского пользователя.

1.2.1.1 Построение с помощью встроенной библиотеки КОМПАС-3D

Продукт российской компании «АСКОН» КОМПАС-3D позволяет создавать модели колёс с помощью встроенной прикладной библиотеки. Кроме этого, возможно рассчитать геометрические параметры колеса. Преимущество КОМПАС-3D перед другими программными продуктами в том, что расчёт и построение геометрии зуба проводится согласно ГОСТам. Для генерации модели колеса необходимо воспользоваться библиотекой «Валы и механические передачи», машиностроительная конфигурация. В новом чертеже необходимо вызвать библиотеку «Валы и механические передачи 2D» через кнопку «Менеджер библиотек» на стандартной панели. Задаём размеры ступицы, посадочного отверстия, выбираем тип зубчатой передачи – червячное колесо цилиндрической червячной передачи. Затем запускаем расчёт

параметров передачи. В открывшемся окне вводим требуемые параметры. При этом модуль выбирается из стандартного ряда чисел. Переходим на Страницу 2 (рисунок 13). На ней нажимаем кнопку «Расчёт». Если появилась надпись «контролируемые, измерительные параметры и параметры качества зацепления в норме», нажимаем кнопку закончить расчёт. Данные расчёта представлены в табл.3. После этого генерируем трёхмерную модель колеса и сохраняем (рисунок 14). Сгенерированное колесо представлено на рисунке 15. Поверхность зуба данного колеса строится сплайном. Однако при других исходных данных не всегда генерируются зубья червячного колеса, возможны ошибки построения, когда генерируется только заготовка. Правильное построение модели червячного колеса доступно только для более поздних версий программы, начиная с КОМПАС-3D V16.

Наименование и обозначение параметра		Червяк	Червячное колесо
Степень точности	—	7-C	7-C
Длина нарезанной части червяка, мм	b_1	66	≥ 66
Ширина венца червячного колеса, мм	b_2	17.5	≤ 26.25
Диаметр измерительного ролика, мм	D	3.464	

Ход расчёта

Рисунок 13. Геометрический расчёт параметров передачи в КОМПАС-3D

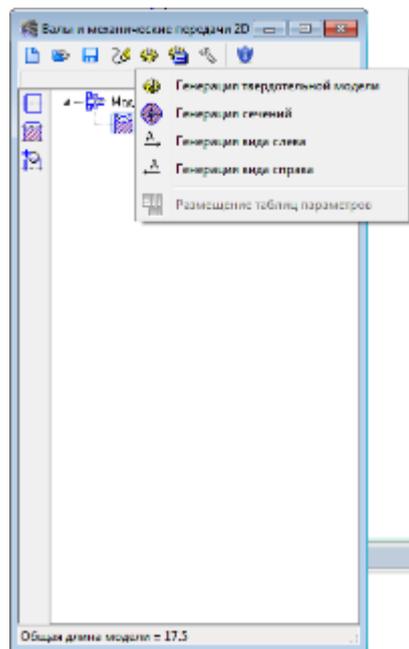


Рисунок 14. Генерация твердотельной модели колеса, КОМПАС-3D

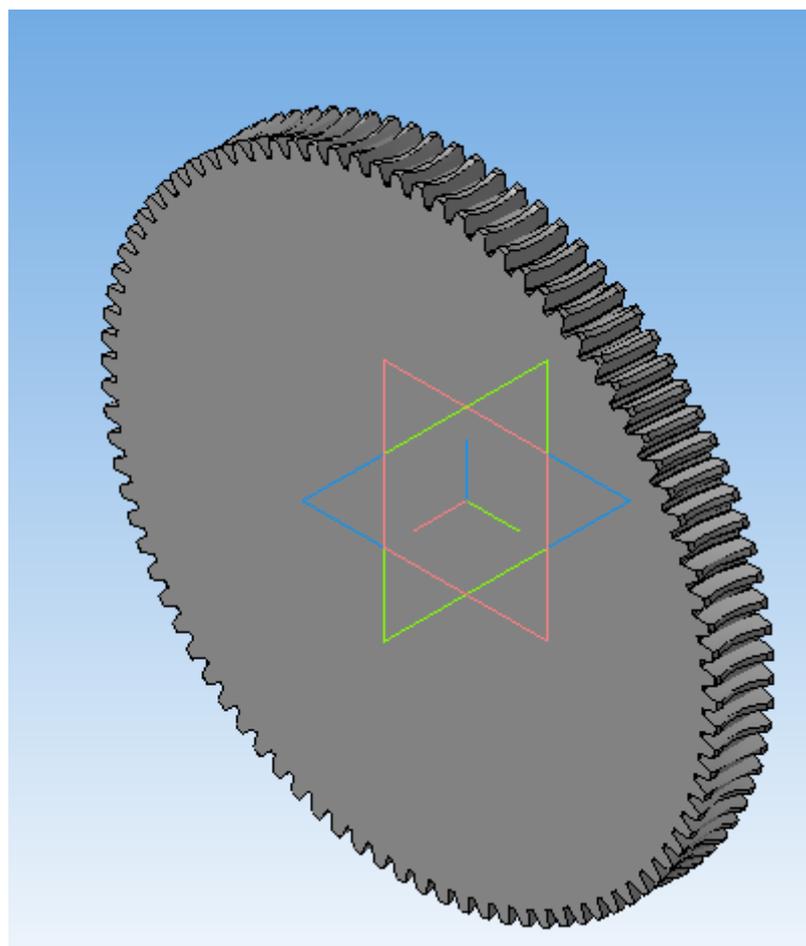


Рисунок 15. Модель червячного колеса, полученная в программе КОМПАС-3D

Таблица 3 – Геометрический расчёт цилиндрической червячной передачи.

Наименование и обозначение параметра	Червяк	Червячное колесо	
Исходные данные			
Число витков (зубьев)	z_1, z_2	1	90
Модуль, мм	m	2	
Коэффициент диаметра червяка	q	15,5	
Вид червяка	–	ZA	
Исходный контур	–	ГОСТ 19036-94	
Угол профиля исходного контура	α_x	20°00'00''	
Коэффициент высоты головки витка червяка исходного контура	h_{a1}^*	1	
Коэффициент радиального зазора у поверхности впадин червяка (исходного контура червячного колеса)	c^*	0,25	0,2
Коэффициент расчётной толщины витка червяка	s^*	1,571	
Коэффициент радиуса кривизны переходной кривой витка червяка	ρ_{f1}^*	0,3	
Степень точности	–	7-С	7-С
Коэффициент смещения червяка	x	0	
Направление линии витка	–	правое	
Определяемые параметры			
Межосевое расстояние, мм	a_w	105,5	
Передаточное число	u	90	
Делительный диаметр, мм	d	31	180
Начальный диаметр червяка, мм	d_{w1}	31	
Делительный угол подъёма	γ	3°41'29''	

Продолжение таблицы 3

Начальный угол подъёма	γ_w	3°41'29''	
Основной угол подъёма	γ_b	20°19'27''	
Основной диаметр червяка, мм	d_b	5,4	
Высота витка червяка, мм	h_1	4,5	
Высота головки витка червяка, мм	h_{a1}	2	
Диаметр вершин, мм	d_a	35	184
Диаметр впадин, мм	d_f	26	174,8
Наибольший диаметр червячного колеса, мм	d_{ae2}	188	
Длина нарезанной части червяка, мм	b_1	66	
Ширина венца зубчатого колеса, мм	b_2	17,5	
Радиус кривизны переходной кривой червяка, мм	ρ_{f1}	0,6	
Радиус выемки поверхности вершин зубьев червячного колеса, мм	R_{a2}	13,5	
Радиус выемки впадин червячного колеса, мм	R_{f2}	18,1	
Угол скашивания торцев зубчатого венца червячного колеса	Φ_2	30°58'40''	
Контролируемые и измерительные параметры			
Расчётный шаг червяка, мм	p_1	6,283	
Ход витка, мм	p_{z1}	6,283	
Делительная толщина по хорде витка червяка, мм	$\overline{s_{a1}}$	3,135	
Высота до хорды витка, мм	$\overline{h_{a1}}$	2	
Диаметр измерительного ролика, мм	D	3,464	
Размер червяка по роликам, мм	M_1	35,979	
Отсутствие подрезания зубьев червячного колеса	–	выполнено	

Продолжение таблицы 3

Отсутствие заострения зубьев червячного колеса	–	Выполнено
Коэффициент перекрытия	ε	1,908
Наименьшая суммарная длина контактных линий	l_{min}	37,277

1.2.1.2 Проектирование с помощью базовых формул эвольвентного зацепления

Для построения профиля боковой поверхности зуба червячного колеса с помощью базовых формул эвольвентного зацепления необходимо рассчитать координаты точек эвольвенты. Расчёт будет проводиться для центрального сечения червячного колеса. Для упрощения это сечение будет заменено цилиндрическим прямозубым колесом с теми же параметрами.

Расчёт точек эвольвенты

Рассчитаем диаметр основной окружности:

$$d_b = m \cdot z \cdot \cos \alpha;$$

$$d_b = 2 \cdot 90 \cdot \cos 20^\circ = 169,1447 \text{ мм}$$

Зададимся углом профиля зуба α_t в торцевом сечении от 0° до 50° .

Расчёт будем проводить для $\alpha_t = 20^\circ$.

Инволюта угла равна:

$$\text{inv } \alpha_t = \text{tg } \alpha_t - \alpha_t;$$

Для расчёта переведем градусы в радианы:

$$20^\circ = \frac{20^\circ}{57,2958} = 0,349066 \text{ рад};$$

$$\text{inv } 20^\circ = \text{tg } 20^\circ - 0,349066 = 0,0149044 \text{ рад}$$

Вычислим радиус-вектор:

$$R = \frac{d_b}{2 \cdot \cos \alpha_t};$$

$$R = \frac{169,1447}{2 \cdot \cos 20^\circ} = 90 \text{ мм}$$

Результаты расчёта представлены в приложении Б:

Перейдём от полярных координат к декартовым:

$$X = R \cdot \cos(\text{inv } \alpha_t), Y = R \cdot \sin(\text{inv } \alpha_t);$$

$$X = 90 \cdot \cos(0,014904367) = 89,99\text{мм};$$

$$Y = 90 \cdot \sin(0,014904367) = 1,341343\text{мм}.$$

Координаты X и Y для других точек представлены в приложении В.

Для построения профиля зуба необходимо знать толщину зуба по делительной окружности. Она вычисляется по формуле:

$$S = 0.5P + 2 \cdot x \cdot m \cdot \text{tg}\alpha;$$

$$S = 0.5 \cdot 6.28 + 2 \cdot 0 \cdot 2 \cdot \text{tg}\alpha = 3.14\text{мм}.$$

Построение модели червячного колеса в SolidWorks по проведённым расчётам

Для графического отображения результатов вычислений необходимо построить модель червячного колеса. Для этого в новом документе создадим эскиз заготовки червячного колеса на плоскости «Справа» (рисунок 16). Заготовка будет получена с помощью команды «Повёрнутая бобышка/основание».

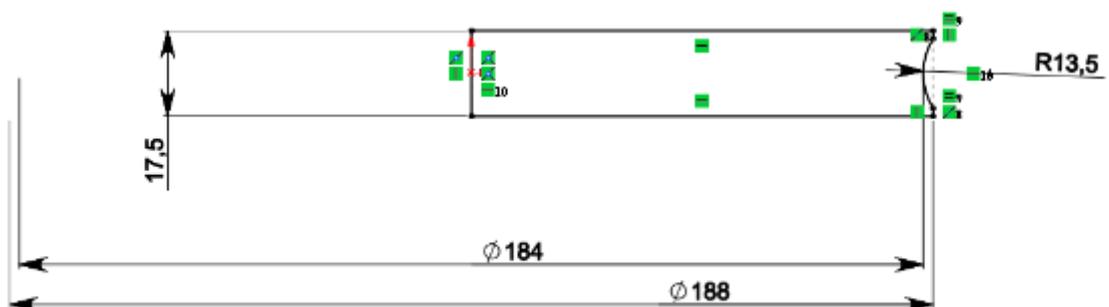


Рисунок 16. Моделирование заготовки червячного колеса

Для вырезания впадины между зубьями необходимо создать эскиз на плоскости «Сверху». В этом эскизе будет построена эвольвента по рассчитанным выше точкам. Для дальнейших построений необходимо, чтобы ось симметрии впадины совпадала с осью Y эскиза. Однако в таком случае точка, относительно которой определяется эвольвента, смещается. Чтобы определить

её положение построим делительную окружность $d = 180\text{мм}$. Проведём ось симметрии впадины. Ширина впадины между зубьями по делительной окружности равна $3,14\text{мм}$. Построим этот отрезок так, чтобы он был симметричен относительно оси и его конечные точки лежали на делительной окружности. Для делительной окружности угол профиля зуба $\alpha_t = 20^\circ$, согласно таблице 5 координаты этой точки $X = 89,99\text{мм}$, $Y = 1,341343\text{мм}$. Следовательно, возможно определить начальную точку относительно точки на делительной окружности. После этого строим теоретически рассчитанные точки, затем проводим через них сплайн. Далее отражаем эвольвенту относительно оси и ограничиваем окружностью впадин и вершин. Расчёт переходной кривой представляет определённую сложность, так как при нарезании червячной фрезой переходная кривая образуется инструментом. Для числа зубьев $z=90$ коэффициента смещения $x=0$ радиус равен $0,47\text{мм}$ [11, стр 615, рис 54].

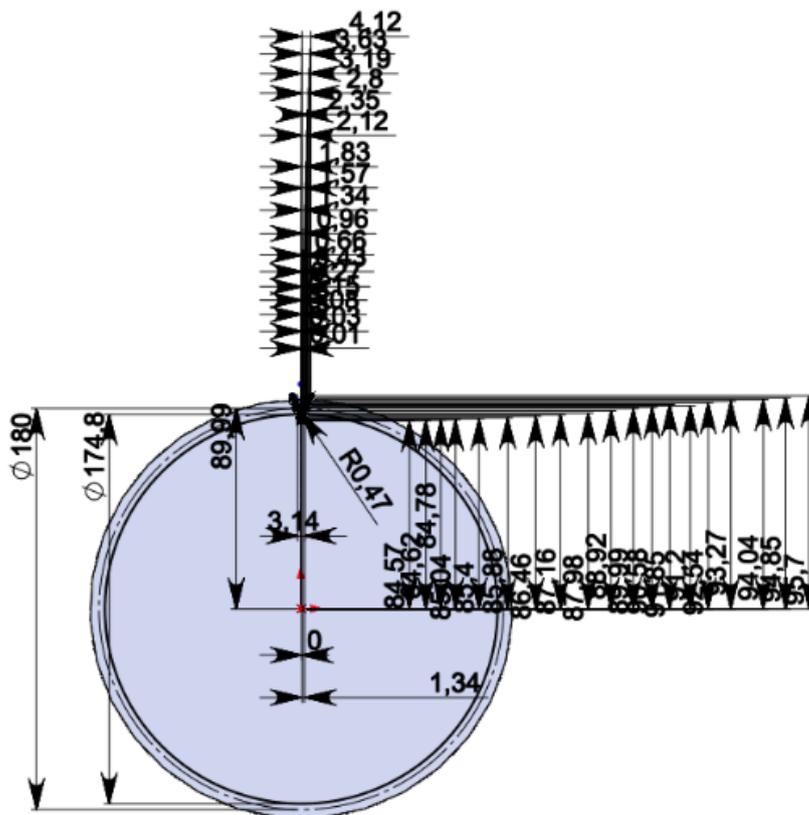


Рисунок 17. Эскиз для построения впадины червячного колеса
Построенный эскиз показан на рисунке 17.

Далее на плоскости «Справа» создаём окружность диаметром, равным начальному диаметру червяка, центр окружности находится на расстоянии $a_w = 105,5$. На панели «Элементы» выбираем «Кривые», «Геликоид и спираль». Спираль определяем шагом и вращением, шаг равен 6,283 (рисунок 18). Для вырезания впадины колеса достаточно половины витка спирали.

Для создания впадины воспользуемся операцией «Вырез-по-траектории». В качестве направляющей кривой выбираем созданную спираль, область для вытягивания – созданный профиль впадины (рисунок 19).

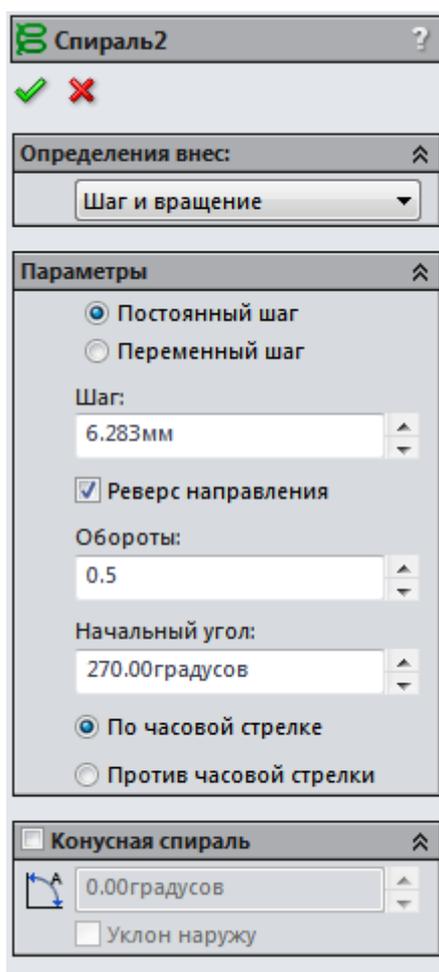


Рисунок 18. Определение спирали

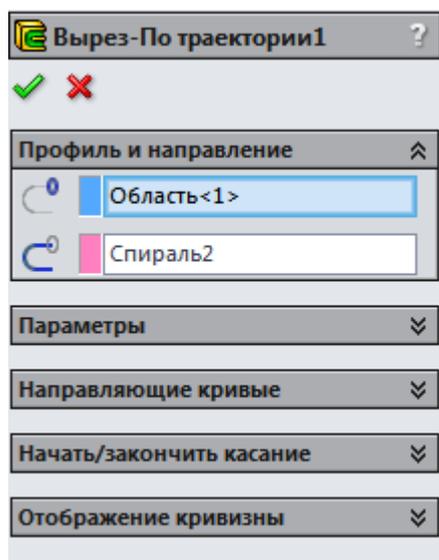


Рисунок 19. Создание выреза по траектории

Последним этапом создания модели является увеличение числа зубьев с помощью кругового массива (рисунок 20). При этом в разделе количество экземпляров указывается количество зубьев и выбирается параметр равный шаг. Полученная модель червячного колеса показана на рисунке 21.

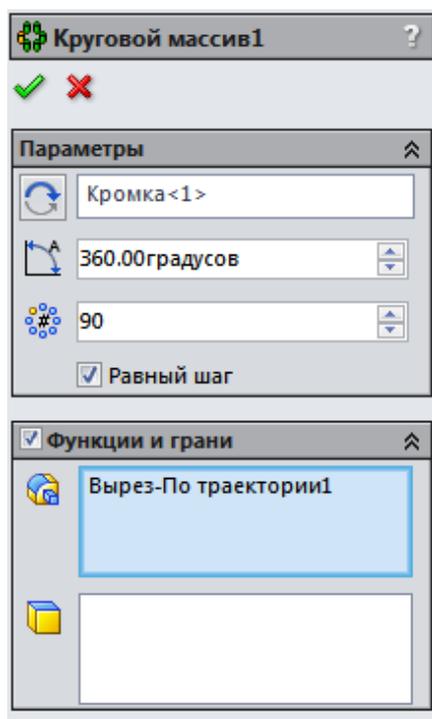


Рисунок 20. Создание массива

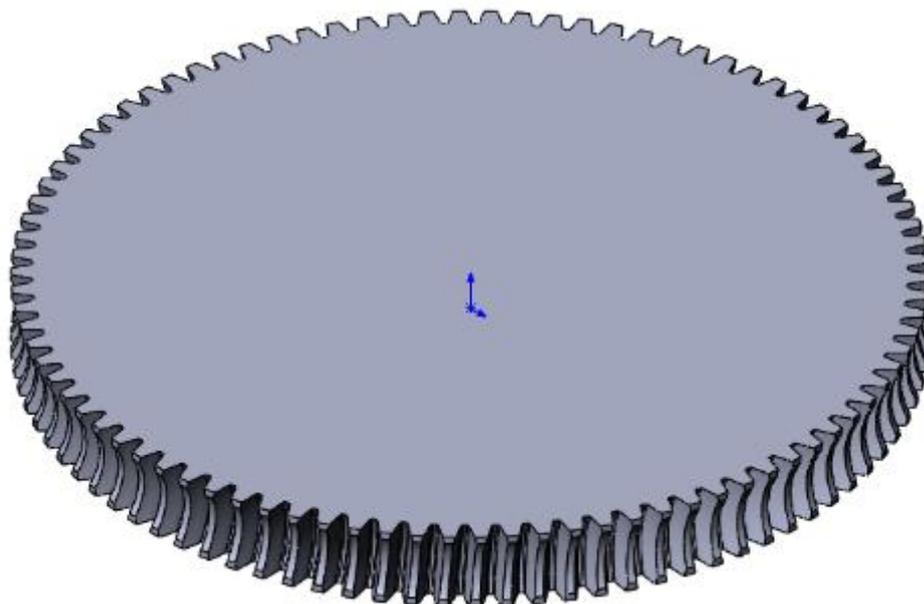


Рисунок 21. Модель червячного колеса, полученная с использованием формул эвольвентного зацепления

1.2.1.3. Построение модели червячного колеса в Kompas-3D с помощью производящей рейки

Предыдущие методы построения просты в реализации, однако в процессе зубонарезания колесо и фреза совершают обкатывающие движения, воспроизвести которые приведёнными выше методами не представляется возможным. В данном разделе рассмотрим способ построения впадины, в котором используется множество различных положений сечения фрезы (рис. 22, 23).

Каждое новое положение сечения находится в отдельном эскизе. После создания заготовки колеса с помощью команды «Операция вращения» на плоскости ZX создаём эскиз сечения фрезы. Проводим осевую линию, совпадающую с осью Y эскиза. От этой линии проводим две параллельные вспомогательные линии, расстояние между ними составляет 3,14мм. От центра окружности отступаем $a_w = 105,5$ мм, проводим горизонтальную прямую. Проводим линии вершин, впадин, делительную. Необходимые значения представлены в таблице 3. В точке пересечения делительной прямой и

вспомогательной вертикальной проводим вспомогательную прямую под углом $\alpha = 20^\circ$. (рисунок 24) Производящий контур сформирован, теперь необходимо обозначить его основными линиями и скопировать на необходимую длину.

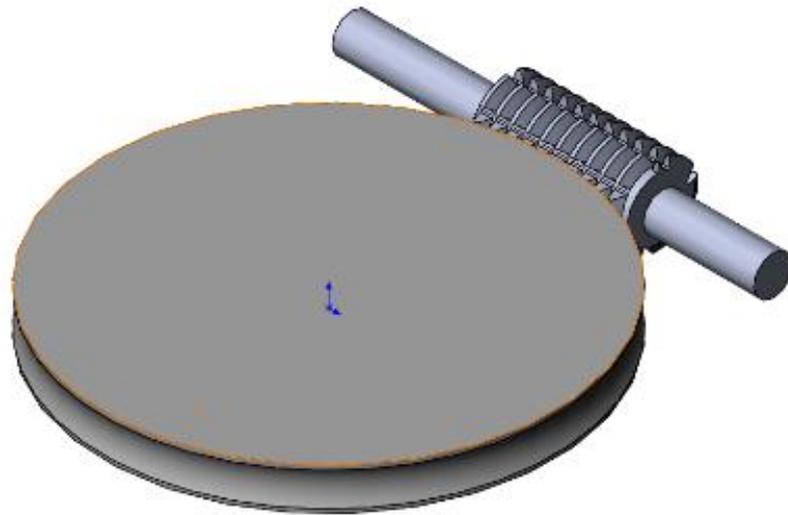


Рисунок 22. Модель зубонарезания червячной фрезой

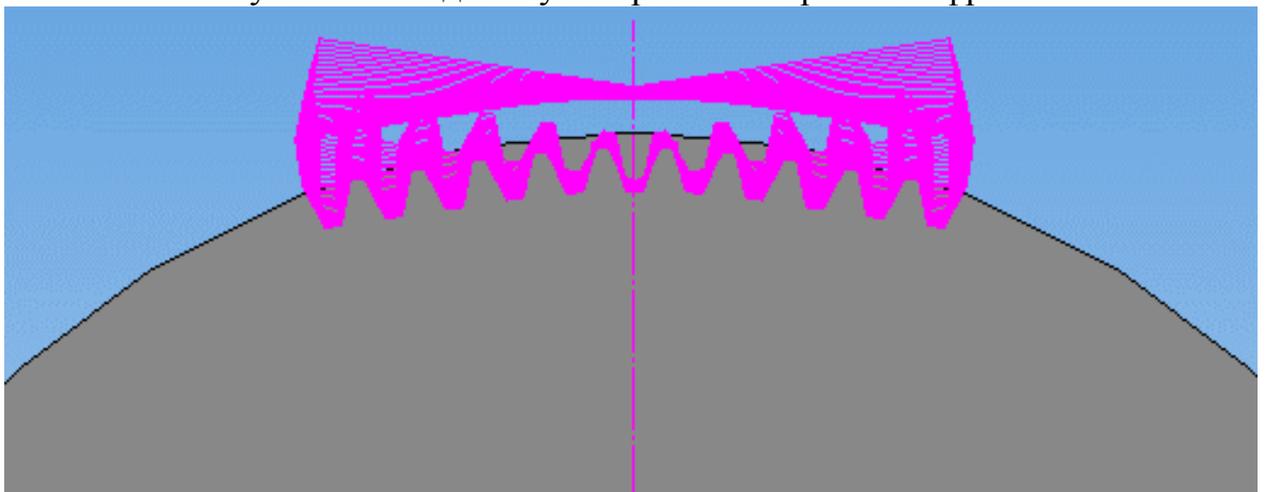


Рисунок 23. Множество положений производящего сечения фрезы

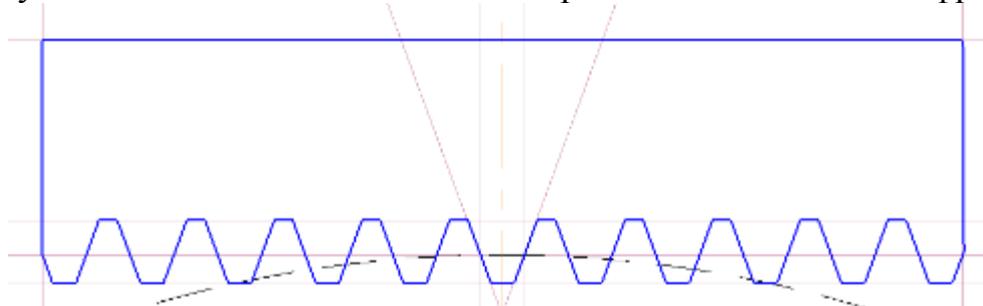


Рисунок 24. Эскиз сечения червячной фрезы

Созданный контур является центральным положением сечения фрезы. Его необходимо сместить и повернуть, для данного колеса потребовалось 27 положений.

Фреза, которой нарезаются зубья червячного колеса имеет 6 зубьев. Разделим расчётный шаг червяка на 6 частей: $\frac{6,283}{6} = 1,047167$ мм. На данную величину эскиз будет смещаться по оси X относительно предыдущего эскиза. Для смещения пользовались командой «Сдвиг». Кроме сдвига сечение совершает поворот вокруг центральной точки колеса. Сечение поворачивается на величину $\frac{360^\circ}{6 \cdot 90^\circ} = 0,6667^\circ$ относительно предыдущего эскиза с помощью команды «Поворот». При положительном сдвиге угол поворота положительный.

Впадина образуется вычитанием эскизов по спирали, которая совпадает с винтовой линией червяка. Для каждого сечения необходимо создать спираль, наклонённую под необходимым углом. Это возможно сделать с помощью команды «Массив по концентрической сетке». Сначала создаём спираль для первого эскиза, панель пространственные кривые. Указываем её данные – построение по числу витков и шагу, число витков 0,5, шаг 6,283, направление правое, начальный угол 180° , точка привязки $X = a_w = 105.5, Y = 0$ (Рисунок 25).

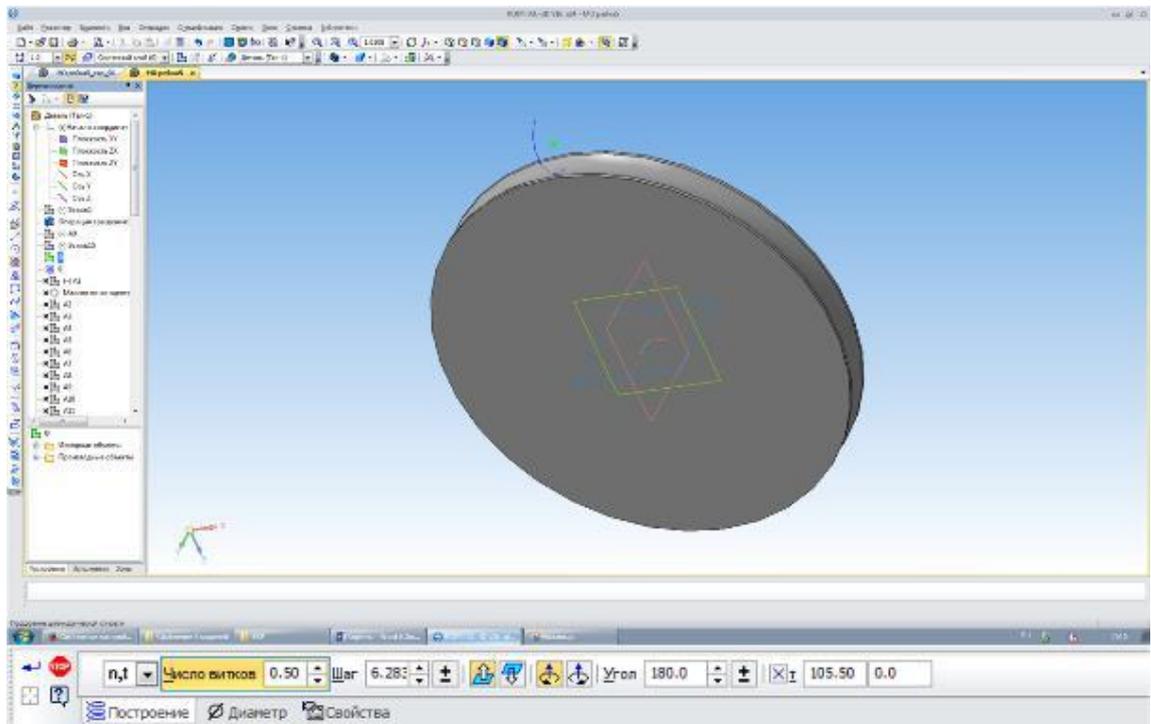


Рисунок 25. Построение спирали

Массив кривых будет создаваться относительно оси Y. Угол наклона между ними равен $0,6667^\circ$, число объектов 14. Создаётся 2 массива, с положительным и отрицательным углом наклона. Созданные спирали показаны на рисунке 26, зелёным выделена базовая кривая

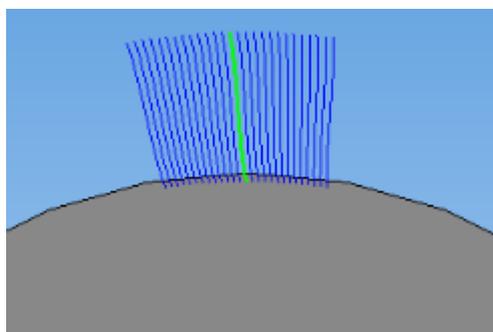


Рисунок 26 Массив спиралей

После подготовительной работы по созданию эскизов и кривых приступаем непосредственно к вырезанию впадины колеса. Это производится с помощью команды «Вырезать кинематически», панель редактирование детали (рисунок 27). При этом необходимо следить за соответствием траектории – спирали и сечения – эскиза.

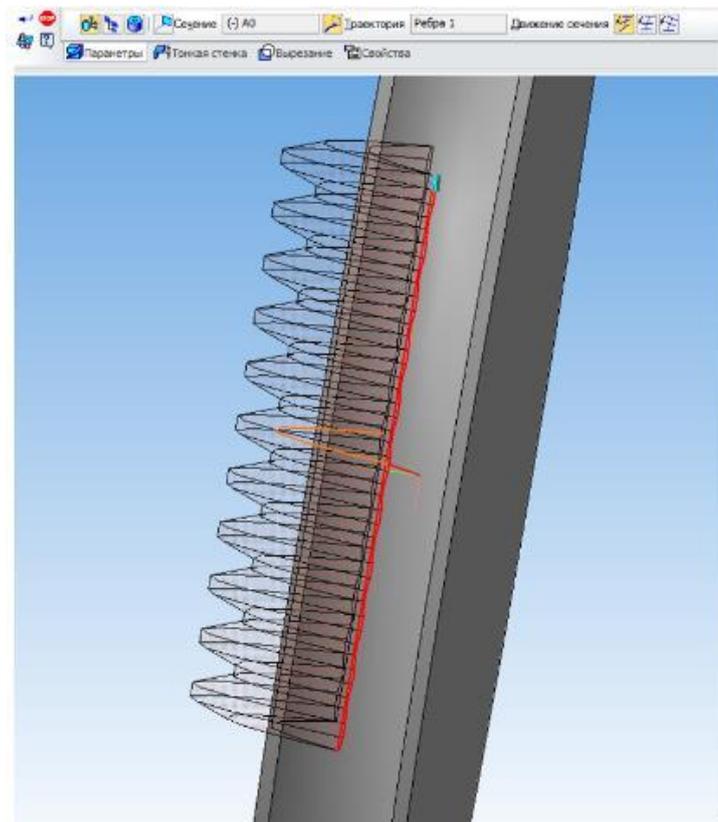


Рисунок 27. Вырезание впадины колеса
Созданный после 27 команд «Вырезать кинематически» фрагмент колеса показан на рисунке 28.

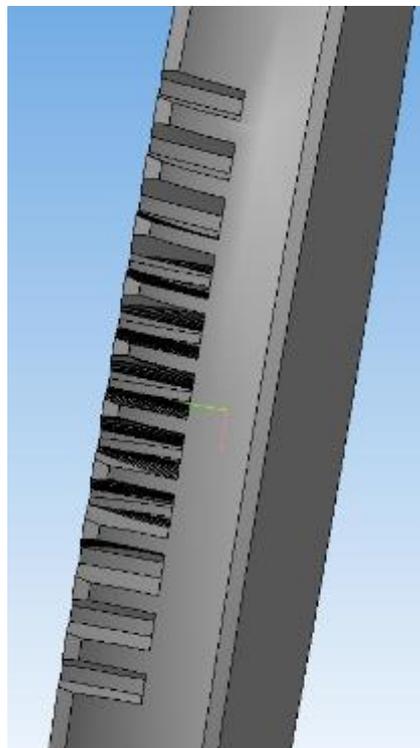


Рисунок 28. Сектор червячного колеса

1.2.1.4. Построение модели червячного колеса в SolidWorks путем имитации процесса зубонарезания методом обката

В предыдущем разделе рассматривалось нарезание зубьев фрезой, имеющей шесть зубьев. Червяк в червячном зацеплении упрощённо можно представить как фрезу с бесконечным числом зубьев.

Последовательность построения этим методом описана ниже.

Сначала необходимо построить заготовку червячного колеса, как описано в пункте 1.2.1.2. После этого на плоскости «Спереди» создаём эскиз, в котором строим окружность с диаметром, равным диаметру впадин червяка $d_f = 26\text{мм}$, центр окружности находится на расстоянии $a_w = 105,5\text{мм}$. Затем с помощью команды «Вытянутая бобышка/основание» создаём тело червяка. Вытягиваем на 66 мм используя среднюю плоскость. Обязательно нужно убрать отметку возле надписи «Объединить результаты». Результат показан на рисунке 29.

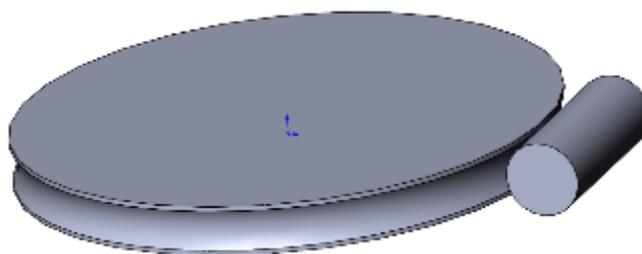


Рисунок 29. Промежуточный результат построения

Следующим этапом является моделирование витков червяка. Для этого необходимо создать справочную плоскость, параллельную плоскости «Справа» и отстоящую от неё на 105,5 мм. На этой плоскости создаём эскиз сечения витка червяка. При работе с эскизом удобно пользоваться командой «Динамическое отражение эскиза». Для её использования необходима ось, в первую очередь проводим её. Затем откладываем отрезки, два параллельных, один под наклоном. Построения зеркально отображаются относительно оси. Расставляем рассчитанные в пункте 1.2.1 размеры. Когда эскиз полностью определён, он становится чёрным (рисунок 30).

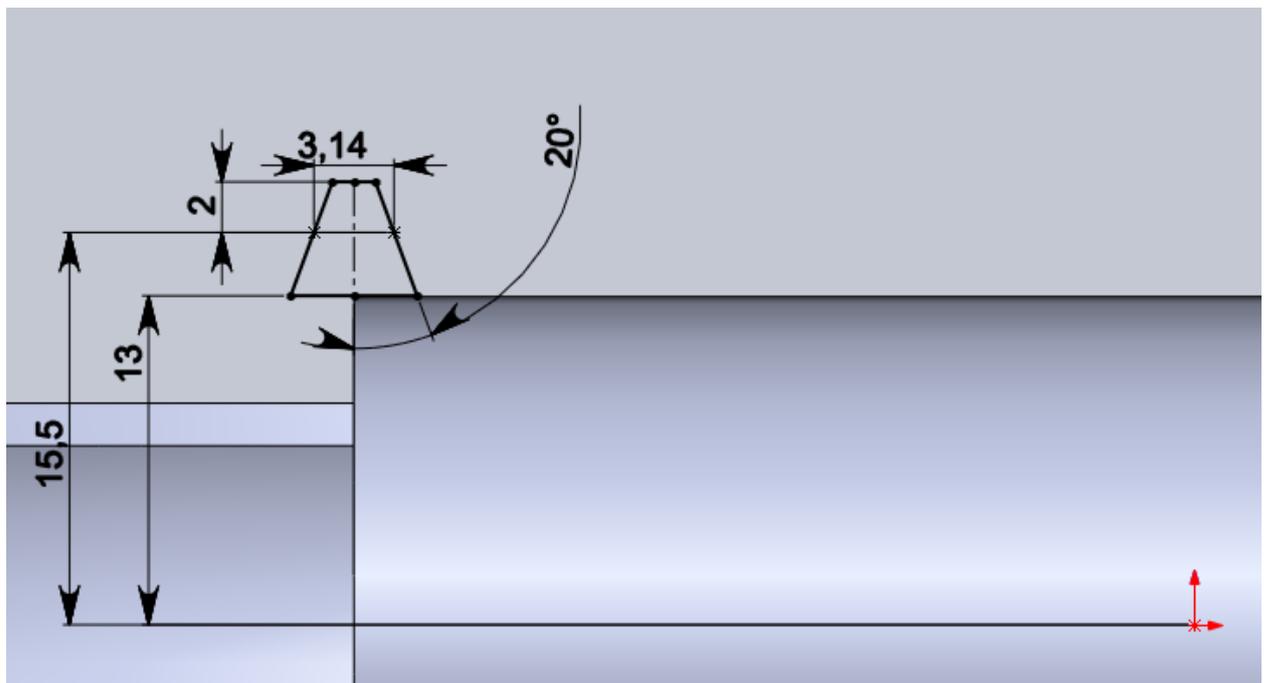


Рисунок 30. Эскиз витков червяка

Далее необходимо создать спираль, по которой будет вытягиваться эскиз. Для этого на плоскости торце бобышки создадим эскиз. Спираль определяется с помощью окружности. Чтобы уменьшить время на определение положения окружности на плоскости воспользуемся командой «Преобразование объектов», панель инструментов «Эскиз». Выбираем кромку на бобышке, вытянутой в предыдущей операции, создаётся полностью определённая окружность с взаимосвязью «На кромке».

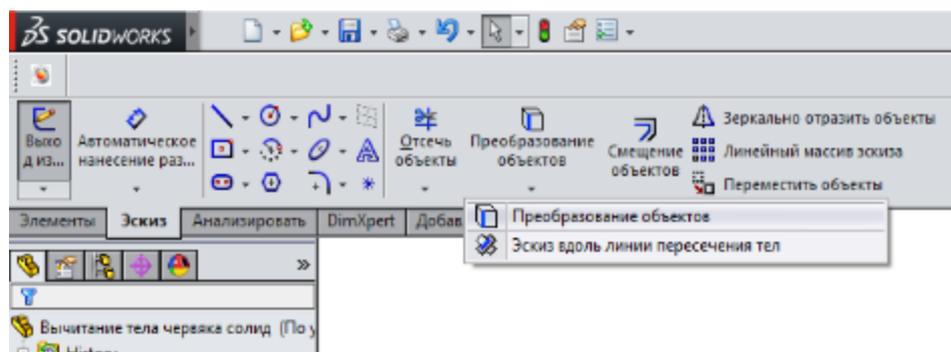


Рисунок 31. Команда «Преобразование объектов»

На панели «Элементы» выберем «Кривые», в выпадающем меню «Геликоид и спираль». Спираль может определяться несколькими методами, выбираем «Шаг и вращение». Шаг спирали равен расчётному ходу червяка,

количество оборотов должно быть таким, чтобы полностью охватить бобышку (рисунок 32)

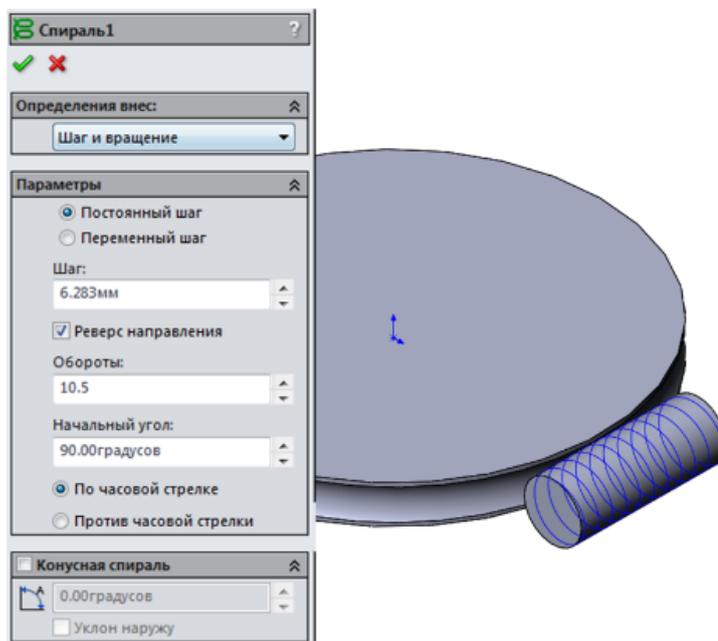


Рисунок 32. Создание спирали

Воспользуемся командой «Бобышка/основание по траектории» на панели «Элементы» для моделирования витков червяка. В качестве профиля выбираем эскиз (рисунок 30), в качестве направления – спираль (рисунок 33). Поверхность червяка создана.

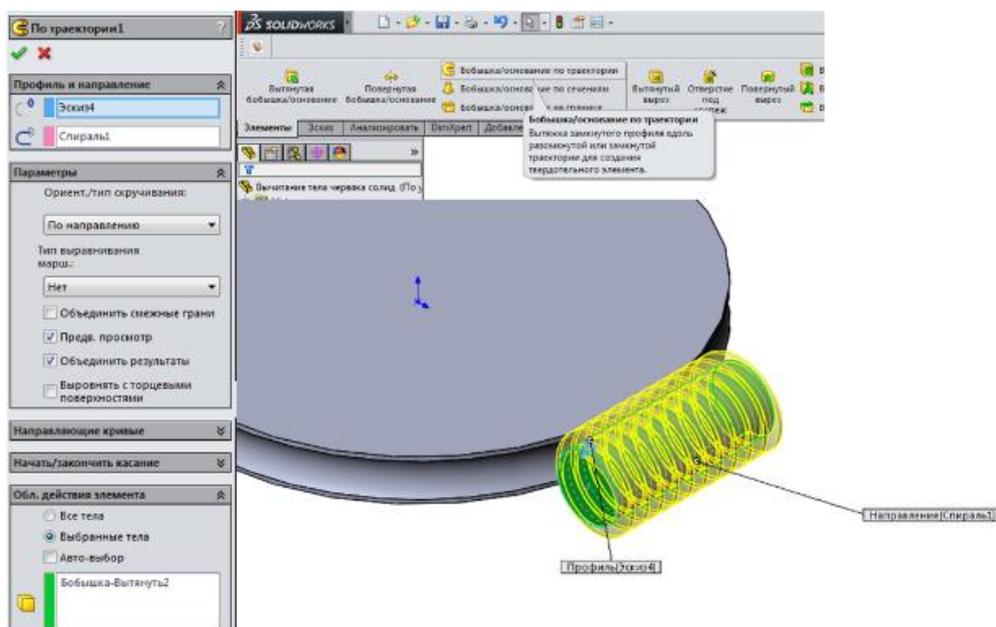


Рисунок 33. Создание витков червяка

вычитании тела червяка он исчезает, поэтому предварительно надо было повернуть и копировать его.

Заготовку колеса после вычитания тела червяка необходимо повернуть. Поворот осуществляется с помощью команды «Переместить /Копировать» вокруг оси Y на 1°.

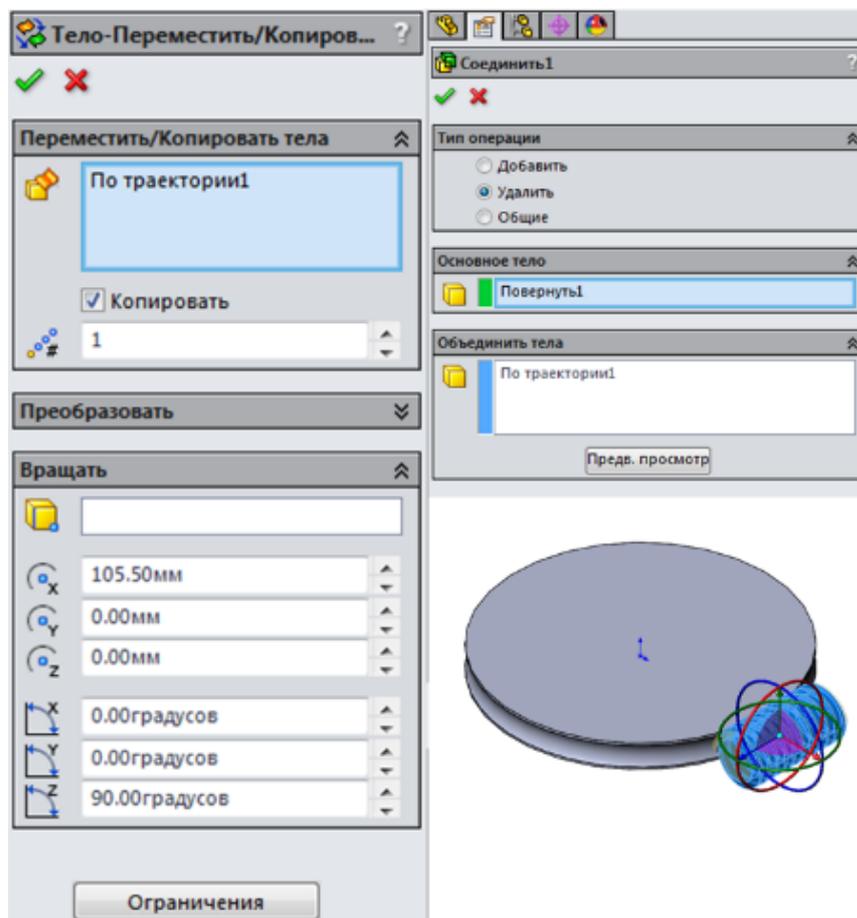


Рисунок 35. Команды «Переместить/Копировать» и «Скомбинировать тела»

Описанные три действия повторяются до получения профиля зуба. Для данного колеса потребовалось 50 циклов. Так как при таком количестве операций дерево построения становится очень большим, целесообразно объединить циклы в папки (рисунок 36). Построение вручную очень монотонно и трудоёмко, занимает много времени. В связи с большим количеством граней затрудняется отображение модели, снижается скорость обработки модели компьютером.

Для получения полной модели колеса необходимо вырезать сектор с нарезанной впадиной. При этом угол сектора должен быть $\frac{360^\circ}{90} = 4^\circ$. Затем полученный участок колеса копируют массивом по кругу. При этом создаётся 90 тел. Их необходимо объединить с помощью команды «Скомбинировать тела».

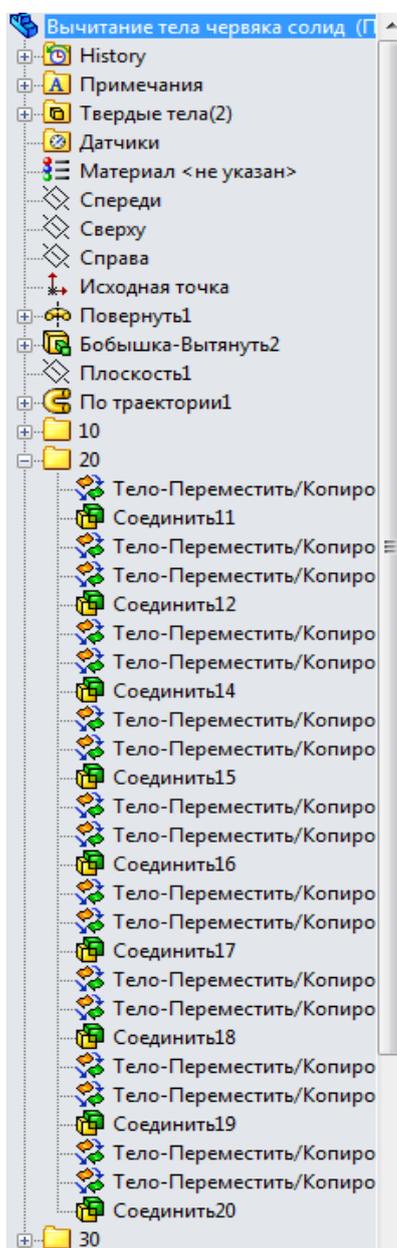


Рисунок 36. Дерево построения модели червячного колеса
Профиль полученных зубьев изображён на рисунке 37.

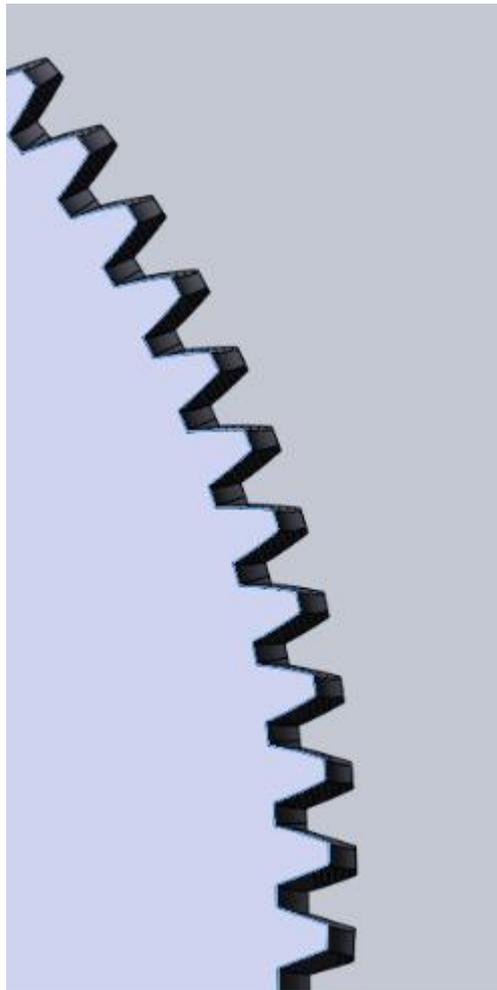


Рисунок 37. Профиль зубьев смоделированного колеса

1.2.2 Изготовление червячного колеса методом огибания

Червячное колесо нарезалось методом с радиальной подачей на универсальном зубофрезерном станке 5310 (рисунок 38). Параметры используемой червячной фрезы приведены в таблице 4. Червячная фреза показана на рисунке 39.

Таблица 4 – Параметры червячной фрезы

Модуль	2
Число витков	1
Направление линии витков	Правое
Угол подъёма витка	$3^{\circ}41'29''$
Число канавок	11
Направление канавок	Прямое
Шаг винтовых канавок	–
Вид червяка	ZA



Рисунок 38. Универсальный зубофрезерный станок 5310



Рисунок 39. Червячная фреза

1.2.3 Измерение на координатно-измерительной машине

Модели, полученные различными методами необходимо сравнить с реальным колесом, чтобы определить, насколько правильно построение. Сравнение будем проводить на координатно-измерительной машине EOS3 REINSHAW. Машина состоит из основания, портала, измерительного инструмента (рисунок 40). В измерительный инструмент входит поворотная моторизованная головка и контактный щуп. Измерительный инструмент перемещается по трём осям – X, Y, Z. Перемещать можно как по одной оси, так и по нескольким одновременно. Для измерения деталей сложной формы можно менять углы наклона измерительной головки. Принцип работы машины заключается в касании контактным щупом детали. В момент касания программное обеспечение фиксирует координаты точки. В случае измерения какого-либо геометрического элемента ПО делает расчёт. Используемое программное обеспечение – PowerInspect.

Машина предназначена для сравнения детали с чертежом либо математической моделью. В данном случае будем действовать наоборот – сравнивать математические модели с деталью.



Рисунок 40. Координатно-измерительная машина

В комплекте с координатно-измерительной машиной поставляются щупы различных габаритов. Контактный щуп очень важная часть измерительной системы, так как именно он соприкасается с деталью и приводит к срабатыванию датчика. Тип и размер щупа определяется измеряемой деталью. Так как нужно измерить точки на впадине червячного колеса, необходимо подобрать такой щуп, чтобы он мог получить доступ ко всей поверхности впадины червячного колеса. Поэтому будем использовать прямой щуп длиной 15мм, диаметром 1мм.

Перед измерением детали щуп необходимо откалибровать для получения надёжных результатов. Эталонная деталь представляет собой калибровочную сферу. Сначала необходимо установить углы измерительной головки равными нулю, затем коснуться щупом вершины калибровочной сферы. После этого начинается процесс калибровки.

1.2.3.1 Базирование детали

Важным этапом измерений является выбор базирования детали. При использовании координатно-измерительной машины сложность заключается также в том, чтобы совместить измеренные поверхности реальной детали и математической модели. В PowerInspect есть несколько типов базирований – Базирование ППТ(плоскость, прямая, точка), произвольное базирование, базирование по трём сферам, базирование оптимального совмещения, базирование с помощью системы относительного позиционирования (СОП), базирование из облака точек. Наиболее оптимальным для данного измерения является Базирование СОП. Оно представляет собой очень точный метод базирования с помощью выбранных значений XYZ из геометрических элементов. Будем использовать базирование 3-2-1

Любое твёрдое тело в трёхмерном пространстве имеет шесть степеней свободы. Соответственно, его положение может определено с помощью трёх координат, описывающих перемещение относительно (X,Y,Z) и трёх координат, описывающих поворот вокруг этих осей. Для базирования детали необходимо зафиксировать её перемещения по всем осям. В базировании 3-2-1 один элемент ограничивает три координаты, второй две координаты, третий одну координату.

Базировать будет осуществляться по плоскости, центру окружности и точке на поверхности червячного колеса. Возможно два вида использования плоскости в базировании. Первый – заблокировать направление, в котором фиксируется ориентация плоскости с двумя заблокированными осями вращения. Второй – заблокировать положение, в котором фиксируется ориентация плоскости и её положение вдоль оси. Будет использоваться фиксированное направление. В данном случае центр окружности ограничивает по трём координатам, плоскость двум, точка на поверхности впадины по одной координате (таблица 5).

Таблица 5 – Ограничивающие объекты

Элемент	Оси поворота	Оси смещения
Плоскость	X, Z	-
Центр окружности	-	X, Y, Z
Точка	Y	-

Нарезанное колесо устанавливаем в призму (рисунок 42). Необходимо измерить плоскость, окружность, точку.

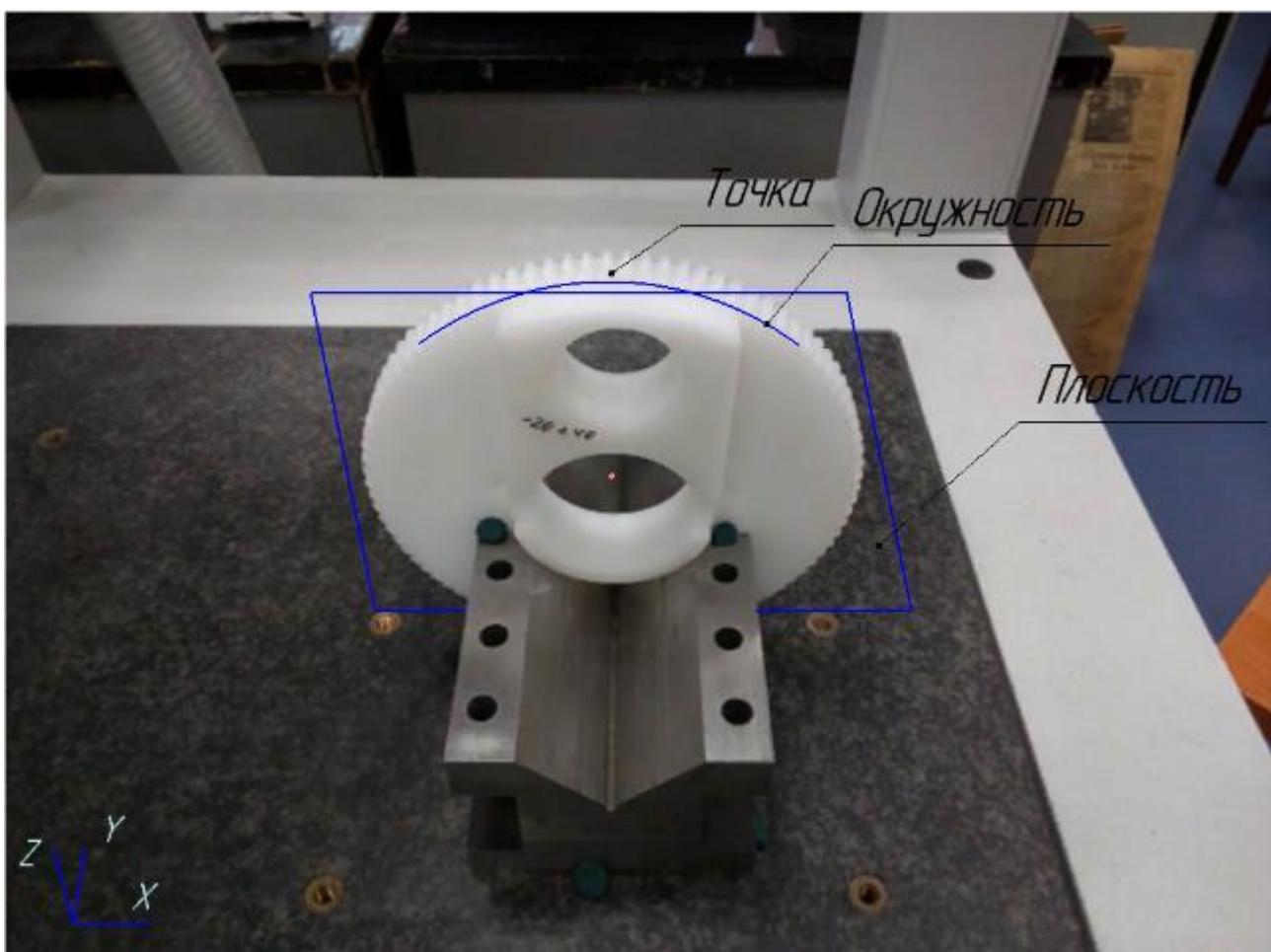


Рисунок 41. Установка колеса для измерения

Для создания базирования нужно создать геометрические элементы, которые будут его определять. Затем выбрать Базирование СОП на панели инструментов Базирование. Откроется диалог Определение базирования СОП (рисунок 43). В выпадающем списке необходимо выбрать ограничивающий элемент – плоскость 3, окружность 2 центр, ДП1, затем нажать ОК.

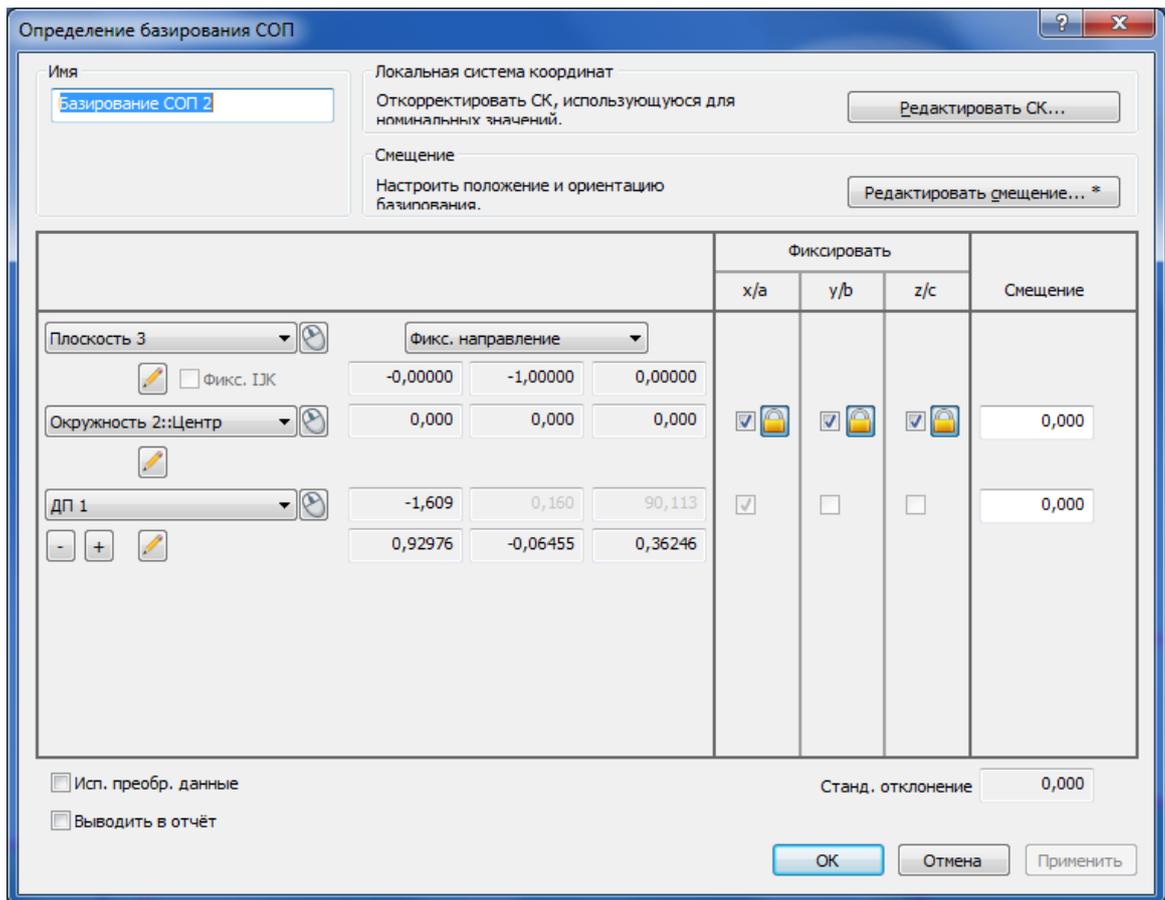


Рисунок 42. Определение базирования

После определения базирования необходимо измерить входящие в него элементы. Измерение происходит за счёт ручного перемещения щупа. После касания щупом поверхности он автоматически отводится. Для определения плоскости требуется минимум три точки (рисунок 44). При наличии нужного количества геометрических элементов ПО строит плоскость. На рисунке 45 показано измерение последнего элемента – точки ДП1. Уже рассчитана плоскость и окружность, зелёным конфетти отмечены точки касания.

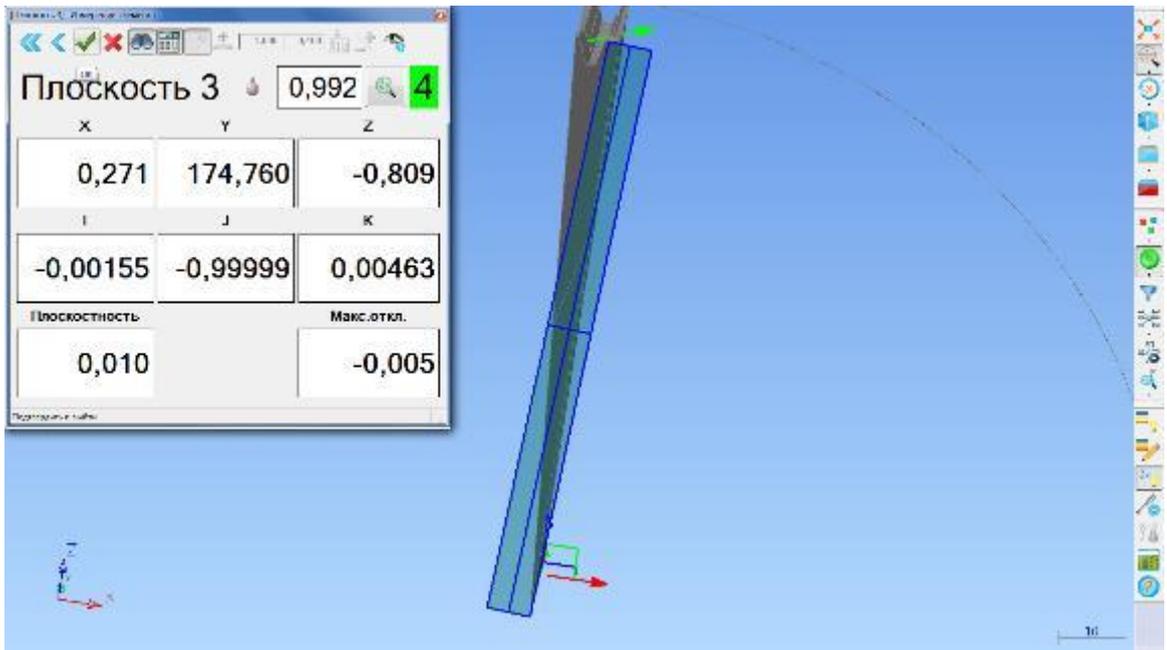


Рисунок 43. Измерение базовой плоскости

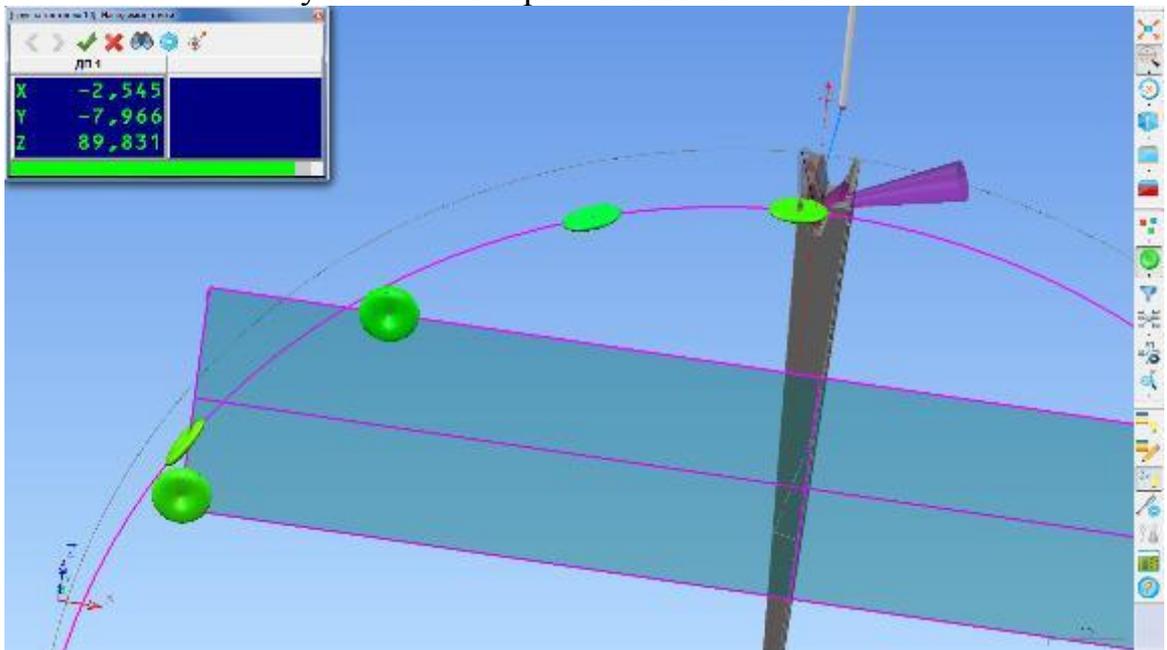


Рисунок 44. Измерение базовой точки ДП1

После измерения всех геометрических элементов может возникнуть необходимость повернуть математическую модель вокруг оси Y для совмещения точки ДП1 на измеряемом колесе и математической модели.

1.2.3.2 Последовательность измерения

Для упрощения обозначений присвоим моделям колеса номера 1-4 (таблица 9)

Таблица 6 – Обозначения разработанных моделей

1	Модель червячного колеса, сгенерированная в <i>КОМПАС-3D</i> (пункт 1.2.1.1)
2	Модель червячного колеса, построенная с помощью базовых формул эвольвентного зацепления (пункт 1.2.1.2)
3	Модель червячного колеса, полученная кинематическим вырезом множества сечений фрезы (пункт 1.2.1.3)
4	Модель червячного колеса, полученная вычитанием тела червяка (пункт 1.2.1.4)

Для контроля боковой поверхности зуба создадим группу облаков точек.

Количество измеряемых точек – 60. Так как необходимо измерить отклонения математической модели от реального колеса нужно создать группу контроля, в которой будет находиться облако точек.

1.3. РЕЗУЛЬТАТ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.3.1 Сравнение профилей моделей червячных колёс, полученных различными способами

Результатом проведённой работы являются четыре модели червячного колеса, полученные с помощью встроенной библиотеки *КОМПАС-3D*, теоретическим расчётом эвольвенты, построением в *Solidworks*, имитацией метода обката вычитанием сечений в *КОМПАС-3D* и имитацией метода обката вычитанием тела червяка в *Solidworks*.

Для проверки геометрической точности профилей колёс рассмотрим центральное и торцевые сечения каждого профиля.

Профили боковой стороны зуба в центральной секущей плоскости показаны на рисунке 46. Кривая 1 показывает профиль, полученный библиотекой *КОМПАС-3D*, кривая 2 – профиль, полученный с помощью теоретически рассчитанной эвольвенты, 3 – профиль, полученный имитацией метода обката вычитанием сечений, 4 – профиль, полученный имитацией обката телом в *Solidworks*.

Отличие профиля, сгенерированного встроенной библиотекой *КОМПАС-3D*, от полученного имитацией обката телом составляет 0,057мм. Отличие профиля, полученного с помощью теоретически рассчитанной эвольвенты, от профиля четыре составляет 0,014мм. Отличие профиля, полученного с имитацией метода обката вычитанием сечений в *КОМПАС-3D*, от профиля, полученного имитацией обката телом, составляет 0,002мм. Измерения проводились по окружности вершин.

При измерении по делительной окружности отличие профиля, сгенерированного встроенной библиотекой *КОМПАС-3D*, от полученного имитацией обката телом составляет 0,05мм. Отличие профиля, полученного с помощью теоретически рассчитанной эвольвенты, от профиля четыре составляет 0,005мм. Отличие профиля, полученного с имитацией метода обката

вычитанием сечений в *КОМПАС-3D*, от профиля, полученного имитацией обката телом, составляет 0,003мм.

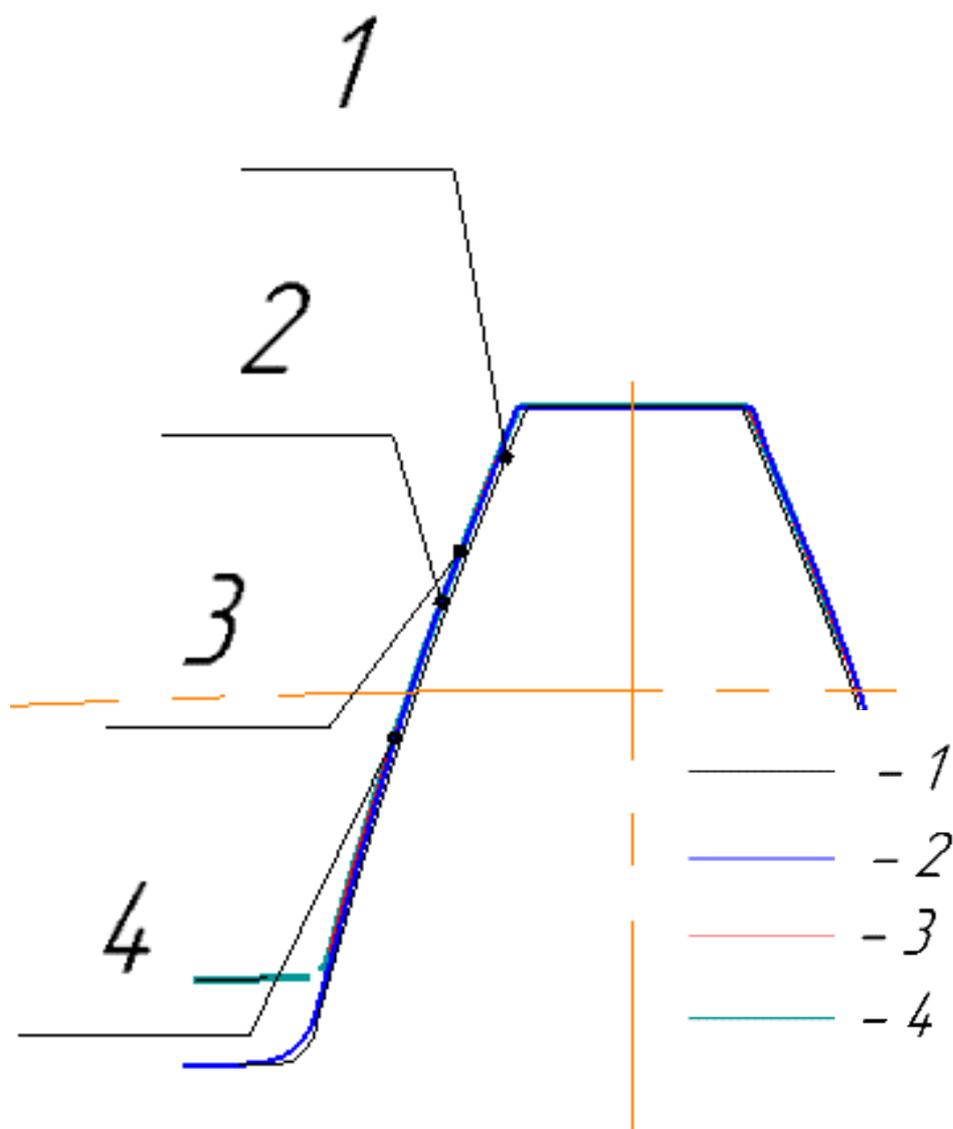


Рисунок 45. Проверка профиля зуба червячного колеса в центральной секущей плоскости

Профиль зуба колеса, сгенерированный библиотекой *КОМПАС-3D*, практически совпал с другими тремя профилями. Однако для других начальных данных возможны ошибки построения, особенно в ранних версиях программы. Так как на машиностроительных предприятиях не всегда используется новейшее программное обеспечение полагаться на построение в *КОМПАС-3D* нельзя.

Колесо, построенное с помощью формул эвольвентного зацепления, обеспечивает правильный профиль. Однако для построения колеса таким способом необходимо провести достаточно трудоёмкие расчёты и построения. Так же затруднён расчёт переходной кривой – при нарезании червячной фрезой она получается в процессе резания. Таким образом, процесс расчёта и построения колеса с помощью формул эвольвентного зацепления не является оптимальным.

Колесо, построенное в Solidworks имитацией метода обката, имеет правильную геометрию зуба, так как оно сцепляется с виртуальным червяком, имеющим параметры реального червяка, который будет использоваться в передаче. Также возможности Solidworks позволяют параметризовать построения, таким образом, построенную модель колеса можно будет использовать при других параметрах зацепления. Минусом данного метода является большое количество повторяющихся операций, что сказывается на размере рабочего файла и скорости построения. Будем считать, что наиболее близкая к реальному, нарезанному червячной фрезой колесу является модель, полученная способом, при котором воспроизводились движения червячной фрезы с бесконечным числом зубьев и колеса.

Так как геометрия червячного колеса достаточно сложная, нельзя сделать вывод о правильности построения, опираясь только на сравнение одного центрального сечения. Далее рассматриваются торцевые сечения полученных моделей червячного колеса.

Совместим модели червячных колёс в сборке Solidworks. Модель колеса, полученную имитацией метода обката в Solidworks будем называть базовой. На рисунке 47 показано сравнение базового червячного колеса (4, синее) с колесом, сгенерированном библиотекой КОМПАС-3D (1, красное). Видно, что по мере приближения к торцовым поверхностям колеса 3D-модели не совпадают. Отклонение на торцевой поверхности составляет около 0,23 мм.

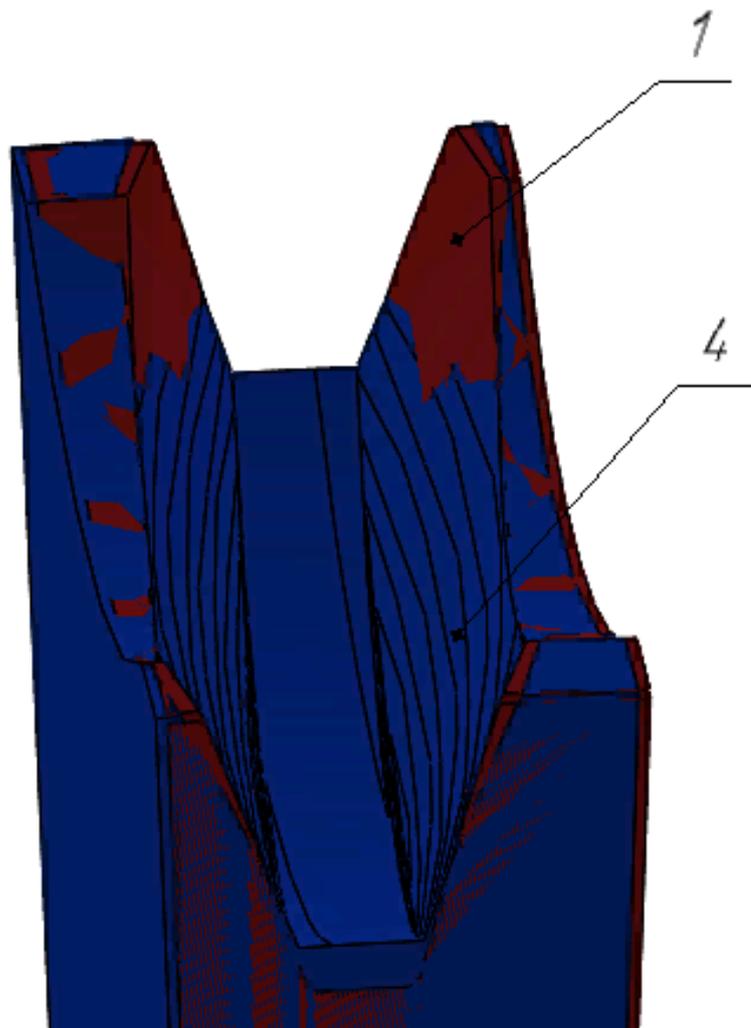


Рисунок 46. Сравнение сгенерированного библиотекой КОМПАС-3D колеса с базовым

Аналогичная картина наблюдается и при сравнении колеса, впадина которого создавалась вырезом профиля по спирали (рисунок 48, 2, жёлтое). В центральном сечении поверхности моделей совпадают, по мере отдаления от центрального сечения появляется погрешность. Отклонение на торцевой поверхности составляет около 0,32 мм.

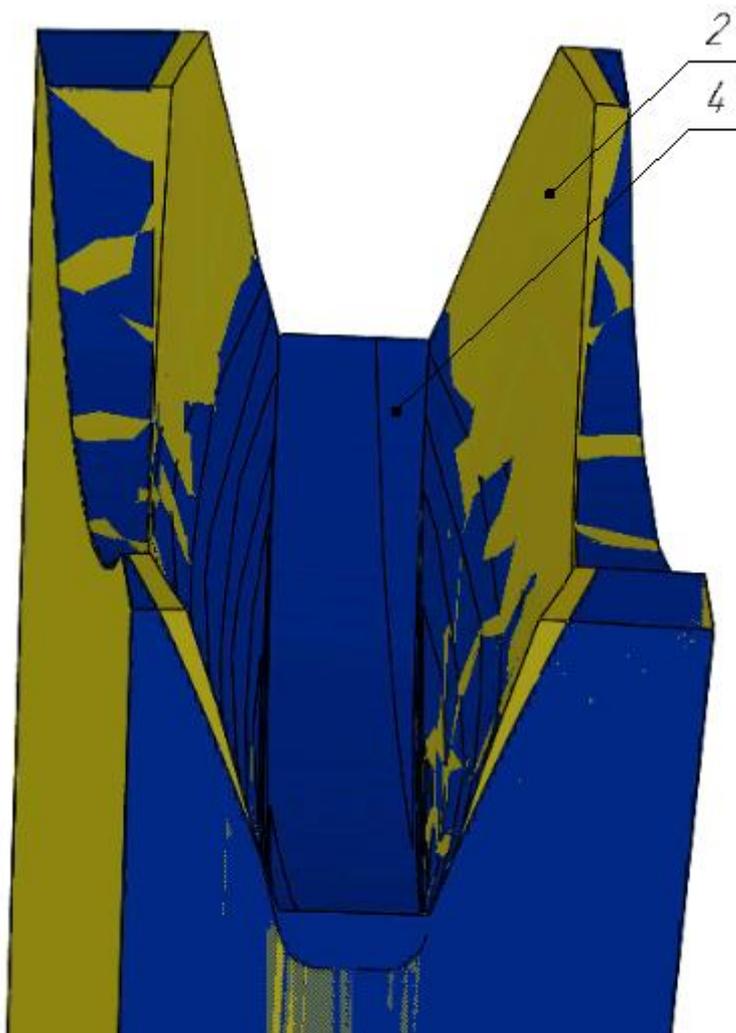


Рисунок 47. Сравнение полученного с помощью формул эвольвентного зацепления колеса с базовым

На рисунке 49 показано сравнение колеса, полученного вычитанием множества плоских эскизов рейки по витку червяка (3, зелёное) с базовым (4, синее). То есть реализовали метод обката, однако использовались не два объёмных тела, а одно объёмное – колесо, и плоские – сечения червячной фрезы (рисунок 23, 24). Визуально в Solidworks не удалось обнаружить отклонения между двумя моделями червячного колеса.

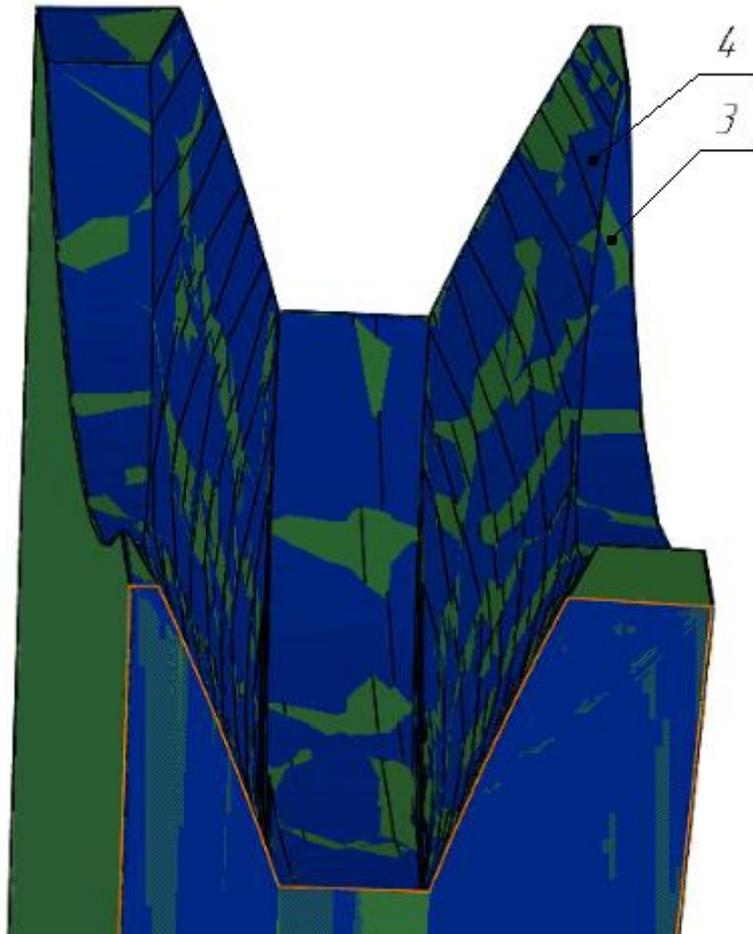


Рисунок 48. Сравнение полученного вычитанием эскизов рейки по спирали колеса с базовым.

1.3.2 Сравнение профилей моделей червячных колёс с нарезанным колесом

На рисунках 50-54 показаны измеренные точки с отклонениями. Точки в поле допуска обозначены зелёным цветом, ниже пределов допуска – синие, выше пределов допуска – красные. Так же есть промежуточные цвета.

Анализируя рисунки можно заметить, что отклонения от допуска располагаются в одних и тех же местах, то есть модели 1-2 неправильно описывают геометрию, оставляя материал по краям впадины. Точки ТП-25, ТП-23, ТП-19, ТП-41, ТП-17 имеют наибольшие отклонения и повторяются в нескольких моделях.

Результаты измерений сведены в таблицу 7. Наиболее точными являются модели, полученные имитацией метода обката. В этих моделях все измеренные точки находятся в пределах допуска. На рисунке 52 показано распределение точек для четвертой модели.

Таблица 7 – Сравнение измеренных моделей колёс

№	Среднее отклонение	Максимальное значение	Минимальное значение
1	0,149	0,786	-0,227
2	0,171	0,797	-0,189
3	0,051	0,018	-0,103
4	0,089	0,095	-0,170

Неточность первых двух моделей можно объяснить тем, что они получены вычитанием одного эскиза по витку червяка, в то время как червячное зацепление образуется вычитанием объёмных тел.

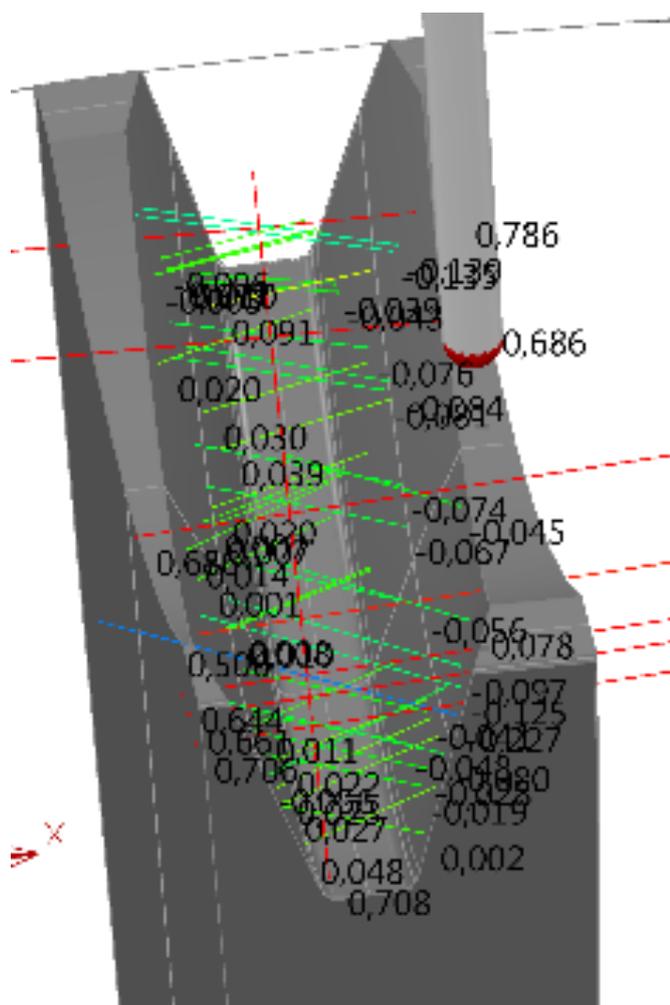


Рисунок 49 Измерение модели 1

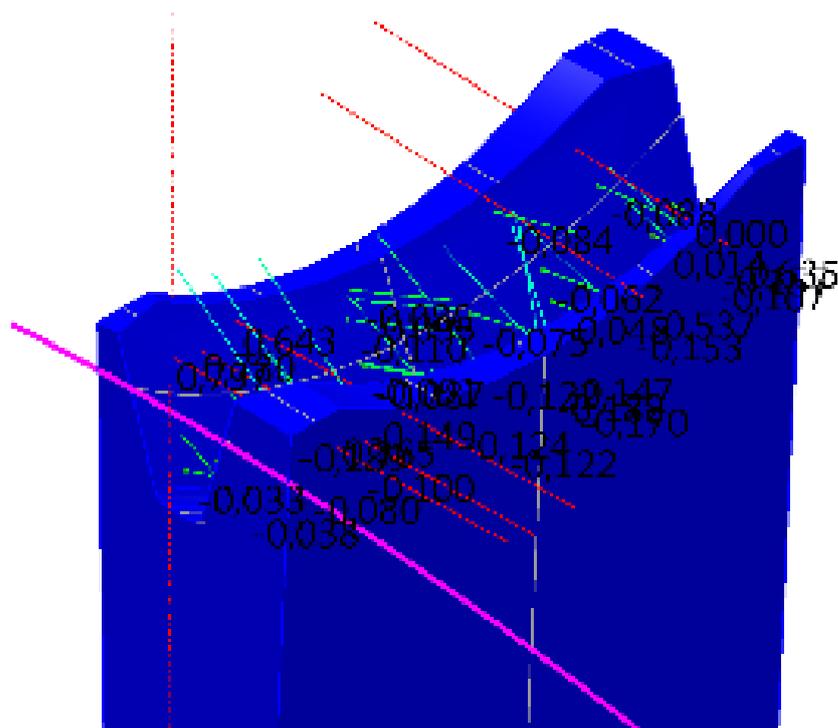


Рисунок 50 Измерение модели 2

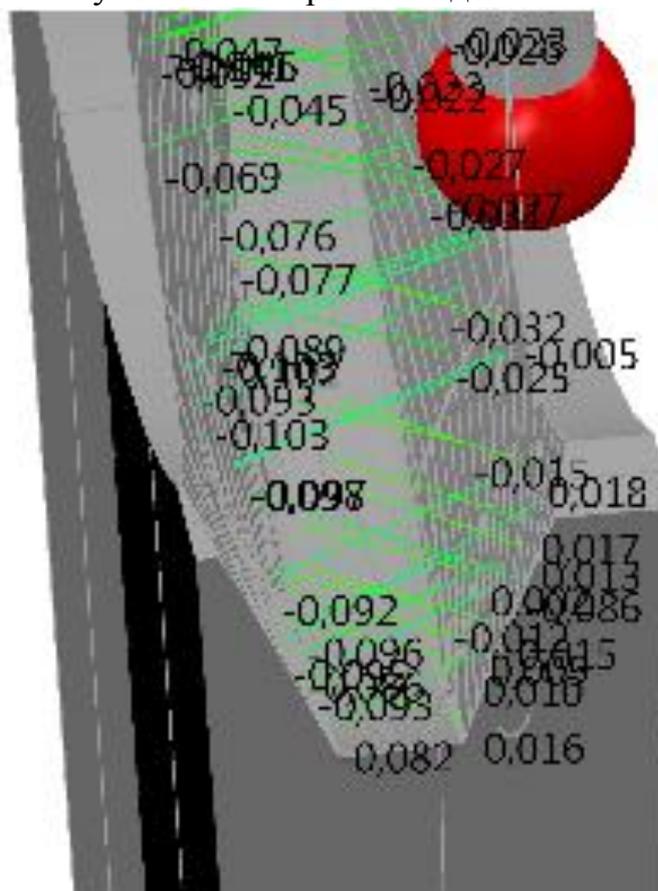


Рисунок 51 Измерение модели 3

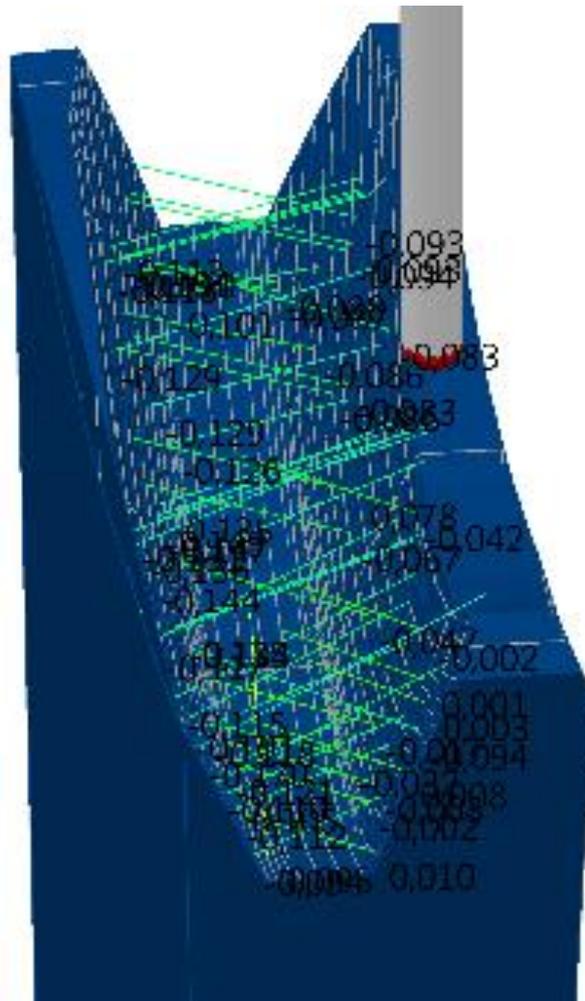


Рисунок 52. Измерение модели 4

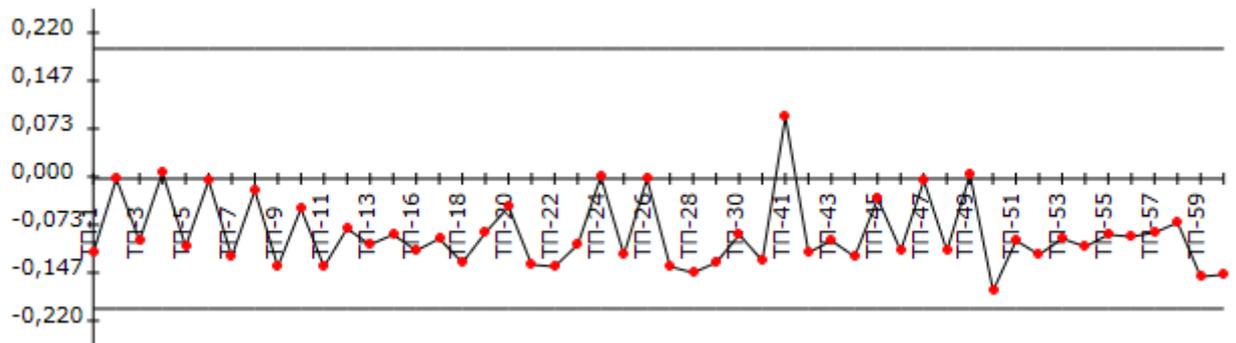


Рисунок 53. Распределение измеряемых точек в модели 4

Сгенерированная стандартной библиотекой модель (модель 1) и модель, полученная с помощью базовых формул эвольвентного зацепления (модель 2) не в состоянии правильно описать поверхность впадины червячного колеса. Они были получены вычитанием плоского эскиза, то есть профиль впадины неизменен во всех сечениях. А в реальном червячном колесе профиль впадины

в различных сечениях изменяется. Следовательно, использовать их для обработки на станке с ЧПУ нельзя.

Наиболее точными оказались модели номер 3 и 4. При этом среднее отклонение модели, полученной вычитанием сечений фрезы на 0,038мм меньше, чем среднее отклонение модели, полученной вычитанием тела червяка. Обе эти модели можно использовать для изготовления на станке с ЧПУ.

Проектирование выбранных моделей 3 и 4 заключалось во множестве повторений одних и тех же команд, построение обеих очень трудоёмко. Однако для модели номер три необходимо создать плоские эскизы, затем сдвинуть и повернуть их, у каждого эскиза своя величина смещения и угол сдвига. Единичное смещение (смещение эскизов друг относительно друга) рассчитывается для каждого колеса исходя из параметров червячной передачи. Для получения модели номер четыре создавалось твёрдое тело, один раз. С этой точки зрения проектирование модели вычитанием тела червяка проще. Кроме того, для обработки таким способом можно написать макрос. Поэтому для дальнейшей работы выбираем модель, полученную вычитанием тела червяка.

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ЛМ61	Ларионова Людмила Владимировна

Школа	ИШНПТ	Отделение	Материаловедение
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	150401/Машиностроение

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>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ) включает в себя: 1. Расчет оплаты труда работников; 2. Расчет стоимости материалов</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Расчёт затрат на исследование</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>При расчете заработной платы труда учитывались отчисления во внебюджетные страховые фонды, которые составляют 30 %.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>1. Составлен портрет потенциального потребителя, выполнен SWOT-анализ, FAST-анализ</i>
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>2. Разработан устав проекта</i>
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>3. Составлен график Ганта, подсчитан бюджет проекта, оценены риски проекта</i>
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>4. Оценена эффективность проекта</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> 1. «Портрет» потребителя результатов НТИ 2. Сегментирование рынка 3. Оценка конкурентоспособности технических решений 4. Диаграмма FAST 5. Матрица SWOT 6. График проведения и бюджет НТИ 7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ 8. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Хаперская Алёна Васильевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ61	Ларионова Людмила Владимировна		

Введение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется в большей степени коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске спонсоров для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Сейчас машиностроение – одна из движущих отраслей промышленности. От уровня развития этой отрасли зависит прогресс в целом. Технический прогресс в отрасли машиностроения характеризуется не только улучшением конструкций машин, но и циклическим улучшением технологии их производства. Очень важно качественно, дешево и в заданные плановые сроки с минимальными затратами живого и овеществленного труда изготовить машину, применив высокопроизводительное оборудование, технологическую оснастку, средства механизации и автоматизации производственного процесса. От выбранной технологии производства во многом зависит качество работы выпускаемых машин, а также более низкие экономические затраты на их эксплуатацию.

Оправданное применение прогрессивного оборудования и инструмента способно привести к значительному снижению себестоимости продукции и трудоёмкости её производства. К таким же результатам может привести и использование совершенных методов обработки деталей.

Улучшение технических параметров относительно предыдущих разработок, безусловно, важно, но коммерческая привлекательность научного исследования зависит от востребованности продукта рынком, его цены, бюджета, времени выхода на рынок.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка

механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

2.1. Предпроектный анализ

На стадии предпроектного анализа будут определены основные показатели заинтересованности инвесторов и участников проекта. Для осуществления предпроектного анализа, воспользуемся упрощенной схемой, рассмотрев потенциальных потребителей результатов исследования, проанализировав конкурентные технические решения с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, выполним FAST и SWOT-анализ а также произведем оценку готовности проекта к коммерциализации и выберем методы коммерциализации результатов.

Конечными потребителями данного проекта являются машиностроительные предприятия, изготавливающие зубчатые редукторы, в частности, червячное зацепление

2.1.1. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Основным конкурентом изготовления червячных колёс на станке с ЧПУ является нарезание методом обката червячной фрезой и методом копирования с использованием дисковой модульной фрезы. Метод обката широко используется в различных типах производства. Метод копирования для червячных колёс используется редко и при отсутствии специального оборудования, позволяющего нарезать колесо методом обката.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i,$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя;

B_i – балл i -го показателя

Таблица 8 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Повышение производительности труда пользователя	0,2		4	1	1	0,8	0,2
Удобство в эксплуатации	0,1	4	4	2	0,4	0,4	0,2
Безопасность	0,15	4	2	2	0,6	0,3	0,3
Точность	0,15	5	4	1	0,75	0,6	0,15
Экономические критерии оценки эффективности							
Конкурентоспособность продукта	0,1	2	4	3	0,2	0,4	0,3
Уровень проникновения на рынок	0,1	1	4	2	0,1	0,4	0,2
Цена	0,1	2	4	3	0,2	0,4	0,3
Срок выхода на рынок	0,1	2	4	3	0,2	0,4	0,3
ИТОГО	1	5	0	17	3,45	3,7	1,95

Из таблицы 8 видно, что описываемая разработка позволяет максимально по сравнению с другими методами обработки повысить производительность. Это объясняется тем, что используются станки с ЧПУ. Так же станки с ЧПУ могут обеспечить бóльшую точность.

2.1.2 FAST-анализ

FAST-анализ выступает как синоним функционально-стоимостного анализа. Суть этого метода базируется на том, что затраты, связанные с созданием и использованием любого объекта, выполняющего заданные функции, состоят из необходимых для его изготовления и эксплуатации и дополнительных, функционально неоправданных, излишних затрат, которые возникают из-за введения ненужных функций, не имеющих прямого отношения к назначению объекта, или связаны с несовершенством конструкции, технологических процессов, применяемых материалов, методов организации труда и т.д.

В качестве объекта FAST-анализа выступает червячная передача. Описание главной, основных, и вспомогательных функций представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранги функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Червячная передача	–	Передача вращающего момента	X		
Червяк	1	Ведущее звено		X	
Ступица червячного колеса	1	Крепление колеса на вал		X	
Венец червячного колеса	1	Находится в зацеплении с червяком		X	
Винты	3	Соединяет ступицу и венец			X

Таблица 10 – Матрица смежности

	Ведущее звено	Крепление колеса на вал	Находится в зацеплении с червяком	Соединяет ступицу и венец
Ведущее звено	=	>	=	<
Крепление колеса на вал	<	=	<	>
Находится в зацеплении с червяком	=	>	=	>
Соединяет ступицу и венец	>	<	<	=

Таблица 11 – Матрица количественных соотношений функции

	Ведущее звено	Крепление колеса на вал	Находится в зацеплении с червяком	Соединяет ступицу и венец	Итого
Ведущее звено	1	1,5	1	0,5	4
Крепление колеса на вал	0,5	1	0,5	1,5	3,5

Находится в зацеплении с червяком	1	1,5	1	1,5	5
Соединяет ступицу и венец	1,5	0,5	0,5	1	3,5
$\Sigma = 16$					

Определяем значимость каждой функции:

$$\text{Ведущее звено: } \frac{4}{16} = 0,25;$$

$$\text{Крепление колеса на вал: } \frac{3,5}{16} = 0,22;$$

$$\text{Находится в зацеплении с червяком: } \frac{5}{16} = 0,31;$$

$$\text{Соединяет ступицу и венец: } \frac{3,5}{16} = 0,22;$$

Таблица 12 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудоемкость детали, нормо-ч	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Червячная передача	–	Передача вращающего момента	–	–	–	–	–
Червяк	1	Ведущее звено		4	100	314	414
Ступица червячного колеса	1	Крепление колеса на вал		2	105	300	405
Венец червячного колеса	1	Находится в зацеплении с червяком		3	120	314	434
Винты	3	Соединяет ступицу и венец		0,5	70	170	240
$\Sigma = 1493$							

Определим относительные затраты на функцию:

$$\text{Ведущее звено: } \frac{414}{1493} = 0,28;$$

$$\text{Крепление колеса на вал: } \frac{405}{1493} = 0,27;$$

Находится в зацеплении с червяком: $\frac{434}{1493} = 0,29$;

Соединяет ступицу и венец: $\frac{240}{1493} = 0,16$;

Информация об объекте, собранная в рамках предыдущих стадий, обобщается в виде функционально-стоимостной диаграммы (Рисунок 54):



Рисунок 54. Функционально-стоимостная диаграмма

Согласно вышеприведенной диаграмме, видно рассогласование по 1, 2, 4 пунктам. Для оптимизации функций можно предложить следующие шаги:

- применения принципиально новых конструкторских решений;
- оптимизации технических параметров;
- применения новых техпроцессов, заготовок и материалов.

В конечном счете результатом проведения FAST-анализа высокотехнологической и ресурсоэффективной разработки должно быть снижение затрат на единицу полезного эффекта, достигаемое путем:

- сокращения затрат при одновременном повышении потребительских свойств объекта;
- повышения качества при сохранении уровня затрат;

- уменьшения затрат при сохранении уровня качества;
- сокращения затрат при обоснованном снижении технических параметров до их функционально необходимого уровня;
- повышения качества при некотором, экономически оправданном увеличении затрат.

2.1.3 SWOT-анализ

Таблица 13 – Матрица SWOT

Strengths(сильные стороны) С1 Высокая производительность С2 Высокая точность С3 Параметризованная модель С4 Отсутствие потребности в специальном инструменте	Weaknesses(слабые стороны) Сл1 Затруднена обработка мелко модульных колёс Сл2 Большой вес модели Сл3 Необходимо наличие 5-координатного станка с ЧПУ
Opportunities(возможности) В1 Нарезание колёс с различными геометрическими параметрами одним инструментом В2 Оптимизация зубчатого зацепления	Threats(угрозы) У1 При переходе на данный метод у предприятия появятся значительные объёмы незагруженного оборудования У2 Сокращение штата сотрудников У3 Модель червячного колеса создана только для геометрии по российским стандартам

После того, как сформированы четыре области переходим ко второму этапу, на котором необходимо выявить соответствия сильных и слабых сторон проекту условиям окружающей среды. Для этого в рамках данного этапа строится интерактивная матрица, при этом каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (означает слабое соответствие)4 «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Интерактивные матрицы представлены в таблицах 14-17.

Таблица 14 – Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны и возможности»

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

Таблица 15 – Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны и возможности»

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	В1	-	0	+

	B2	-	+	0
--	----	---	---	---

Таблица 16 – Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны и угрозы»

Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4
	У1	+	+	+	+
	У2	+	+	+	-
	У3	-	0	+	-

Таблица 17 – Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны и угрозы»

Слабые стороны проекта				
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	-	-	+
	У2	-	-	+
	У3	0	+	-

На третьем этапе строится итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 18.

Таблица 18 – Итоговая матрица SWOT

	Strengths(сильные стороны) C1 Высокая производительность C2 Высокая точность C3 Параметризованная модель C4 Отсутствие потребности в специальном инструменте	Weaknesses(слабые стороны) Сл1 Затруднена обработка мелко модульных колёс Сл2 Большой вес модели Сл3 Необходимо наличие 5-координатного станка с ЧПУ
Opportunities(возможности) В1 Нарезание колёс с различными геометрическими параметрами одним инструментом В2 Оптимизация зубчатого зацепления	В1С2С3С4 В2С3	В1Сл3 В2Сл2

Продолжение таблицы 21

Threats(угрозы) У1 При переходе на данный метод у предприятия появятся значительные объёмы незагруженного оборудования У2 Сокращение штата сотрудников У3 Модель червячного колеса создана только для геометрии по российским стандартам	У1С1С2С3С4 У2С1С2С3 У3С3	У1Сл3 У2Сл3 У3Сл2
--	--------------------------------	-------------------------

2.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

Полезно оценить степень готовности проекта к коммерциализации независимо от её стадии жизненного цикла. Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенций разработчика научного проекта. При проведении анализа по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. Анализ приведён в таблице 19.

Таблица 19 – Оценка готовности проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	5
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	4
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	5
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	5

Продолжение таблицы 21

5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	1	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	2
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	2
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	1	3
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	4
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	2	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	3	3
	ИТОГО БАЛЛОВ	31	43

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i,$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет говорить о мере готовности научной разработки и её разработчика к коммерциализации. В данном случае перспективность средняя. Необходимо доработать пути продвижения проекта на рынок, а так же обеспечить охрану авторских прав.

2.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

При коммерциализации научно-технических разработок продавец преследует вполне определенную цель, которая во многом зависит от того, куда в последующем он намерен вложить полученный коммерческий эффект. Это может быть получение средств для продолжения своих научных исследований и разработок (получение финансирования, оборудования, уникальных материалов, других научно-технических разработок и т.д.), одноразовое получение финансовых ресурсов для каких-либо целей или для накопления, обеспечение постоянного притока финансовых средств, а также их различные сочетания. При этом время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации. Задача данного раздела магистерской диссертации – это выбор метода коммерциализации объекта исследования и обоснование его целесообразности.

Из множества существующих вариантов наиболее предпочтительным для данной разработки является торговля патентными лицензиями. Вид лицензии – простая, патентная, добровольная. Выбрана именно торговля патентными лицензиями в связи с тем, что разрабатывается только геометрия колеса, технологический процесс прописывает производитель колеса. Простая лицензия – в связи с тем, что разработка будет предоставляться всем заинтересованным в производстве червячных колёс на станках с ЧПУ.

2.2 Инициация проекта

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

2.2.1 Цели и результат проекта

В данном разделе необходимо привести информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей. Данная информация представлена в таблице 20.

Таблица 20 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Университет	Наличие НИОКР
Магистрант	Защита магистерского диплома. Получение высшего образования.
Потребители	Возможность производить червячные колёса хорошего качества не закупая специальное зубообрабатывающее оборудование

В таблице 21 представлена информация о иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 21 – Цели и результаты проекта

Цели проекта	Создание геометрически правильной модели червячного колеса для обработки на станке с ЧПУ
Ожидаемые результаты проекта	Параметризованная модель червячного колеса
Критерии приёмки результата проекта	Сравнение полученных профилей колёс, графическое оформление результатов
Требования к результату проекта	Требование:
	Создание модели
	Обработка колеса на станке с ЧПУ

Продолжение таблицы 21

	Проверка профиля боковой стороны зуба колеса
	Графическое оформление результатов

2.2.2 Организационная структура проекта

На данном этапе работы необходимо решены следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определены роль каждого участника в данном проекте, прописаны функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эта информация представлена в таблице 22:

Таблица 22 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час
1	Ларионова Л.В., магистрант	Исполнитель	<ul style="list-style-type: none"> • Обзор существующих разработок • Создание модели червячного колеса • Сравнение профилей колёс • Параметризация модели червячного колеса 	1000
2	Ким А.Б., старший преподаватель	руководитель	<ul style="list-style-type: none"> • Консультация по теоретической части проекта • Помощь при создании 3D-моделей • Организация нарезания пробных колёс • Помощь и проверка при разработке схем контроля 	400

2.2.3 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта.

Таблица 23 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/допущения
Бюджет проекта	100000
Источник финансирования проекта	ИШНПТ, отделение материаловедения
Сроки проекта	15.10.2017-25.05.2018
Дата утверждения плана управления проектом	18.10.2017
Дата завершения проекта	25.05.2018

2.3. Планирование управления научно-техническим проектом.

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

2.3.1 План проекта

При подготовке исполнения конкретного проекта важно правильно планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

В данном пункте составляется перечень проводимых работ, определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным результатом планирования работ является линейный график реализации проекта. Для его построения хронологически упорядоченные данные о перечне работ должны быть сведены в таблицу (таблица 24).

Ожидаемая продолжительность этапов работ $t_{ож}$ рассчитывается по формуле

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

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

Таблица 24 – Перечень работ

№	Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	НР – 100%
2	Постановка задачи	Руководитель	НР – 100%
3	Определение последовательности и сроков выполнения задачи	Руководитель, студент	НР – 100% С – 20%
4	Изучение публикаций по теме	Руководитель, студент	НР – 30% С – 100%
5	Анализ программ-аналогов	Руководитель, студент	НР – 10% С – 100%
6	Разработка модели червячного колеса	Студент	С – 100%
7	Разработка управляющей программы для нарезания колеса на станке с ЧПУ	Студент	С – 100%
8	Нарезание червячного колеса двумя способами	Руководитель, студент	НР – 100% С – 90%
9	Разработка схем сравнения и контроля	Студент	С – 100%
10	Сравнение профилей колёс, контроль	Руководитель, студент	НР – 90% С – 100%
11	Оформление расчётно-пояснительной записки	Студент	С – 100%
12	Подведение итогов	Руководитель, студент	НР – 60% С – 100%

Для примера рассчитаем этап работы №3 – определение последовательности и сроков выполнения задачи. Минимальное время выполнения t_{min} равняется трём, максимальное t_{max} пяти дням (Таблица 25).

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4 \text{ дн}$$

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ($T_{РД}$) ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д}$$

где $t_{ож}$ – ожидаемая продолжительность работы, дн.;

$K_{ВН}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, принимаем $K_{ВН} = 1$;

$K_{Д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ($K_{Д} = 1 \div 1,2$; принимаем $K_{Д} = 1,2$).

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д} = \frac{1,4}{1} \cdot 1,2 = 1,68 \text{ дн.};$$

Так как загрузка научного руководителя составляет 100%, в таблицу заносится значение $T_{РД} = 1,68$. Загрузка студента равна 20%, то есть

$$T_{РД} = 1,68 \cdot 0,2 = 0,34$$

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К}$$

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

$T_{К}$ – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и для шестидневной рабочей недели рассчитываемый по формуле

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}},$$

где $T_{КАЛ}$ – календарные дни ($T_{КАЛ} = 365$);

$T_{ВД}$ – выходные дни ($T_{ВД} = 52$);

$T_{ПД}$ – праздничные дни ($T_{ПД} = 10$).

$$T_{К} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205$$

Продолжительность этапа в календарных днях для научного руководителя и студента соответственно:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К} = 1,68 \cdot 1,205 = 2,02 \text{ дн.};$$

$$T_{\text{кд}} = T_{\text{рд}} \cdot T_{\text{к}} = 0,34 \cdot 1,205 = 0,4 \text{ дн.}$$

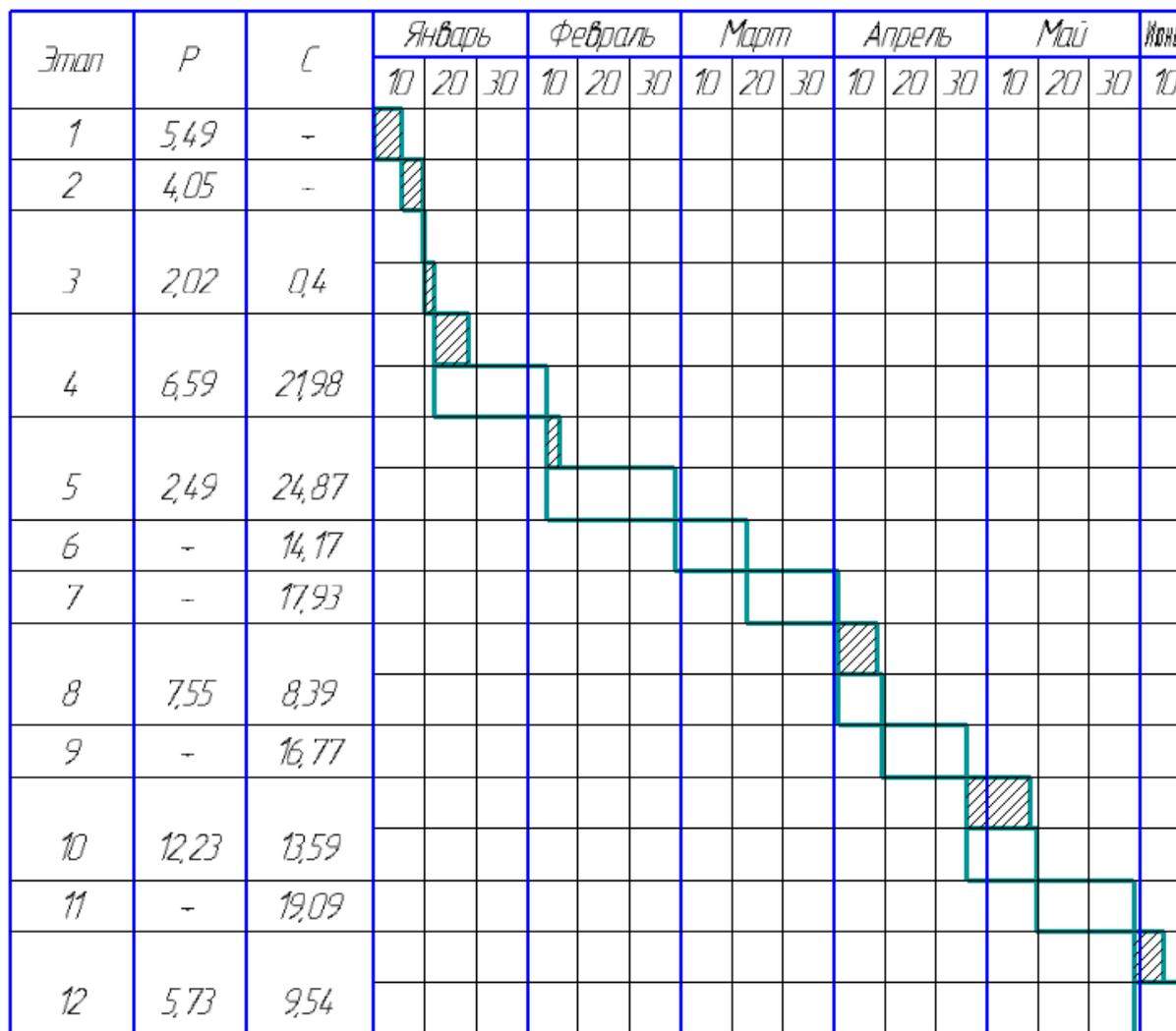
Данные о продолжительности остальных этапов приведены в таблице

26.

Таблица 25 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	$T_{РД}$		$T_{КД}$	
					НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Составление и утверждение технического задания	Р	3	5	3,8	4,56	–	5,49	–
Постановка задачи	Р	2	4	2,8	3,36	–	4,05	–
Определение последовательности и сроков выполнения задачи	Р, С	1	2	1,4	1,68	0,34	2,02	0,4
Изучение публикаций по теме	Р,С	12	20	15,2	5,47	18,24	6,59	21,98
Анализ программ-аналогов	Р,С	14	22	17,2	2,06	20,64	2,49	24,87
Разработка модели червячного колеса	С	7	14	9,8	–	11,76	–	14,17
Разработка управляющей программы для нарезания колеса на станке с ЧПУ	С	10	16	12,4	–	14,88	–	17,93
Нарезание червячного колеса двумя способами	Р,С	5	7	5,8	6,26	6,96	7,55	8,39
Разработка схем сравнения и контроля	С	10	14	11,6	–	13,92	–	16,77
Сравнение профилей колёс, контроль	Р,С	7	13	9,4	10,15	11,28	12,23	13,59
Оформление расчётно-пояснительной записки	С	10	18	13,2	–	15,84	–	19,09
Подведение итогов	Р,С	5	9	6,6	4,75	7,92	5,73	9,54
Итого:				109,2	38,3	121,78	46,16	146,74

Таблица 26 – Линейный график работ



■ - P. □ - C.

2.3.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

2.3.2.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Для выполнения пункта 8 (таблица 25) необходимо приобрести материал для нарезания зубчатого колеса и инструмент, которым будет нарезаться колеса. Им является червячная фреза, чистовая и черновая пальцевые фрезы. Кроме того статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Расчёт затрат на материалы представлен в таблице 27.

Таблица 27 – Расчёт затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Заготовка червячного колеса (прокат круглый)	30руб/кг	190мм ~3,5кг	105
Червячная фреза	2800	1	2800
Пальцевая фреза	470	2	940
Всего за материалы			3845
Транспортно-заготовительные расходы			192,25
Итого:			4037,25

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны:

$$C_{\text{мат}} = 3845 \cdot 1,05 = 4037,25 \text{руб}$$

2.3.2.2 Специальное оборудование для научных работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования. Так как необходимое оборудование имеется на кафедре, его стоимость учитывается в виде амортизационных отчислений.

Используется формула:

$$C_{\text{ам}} = \frac{N_A \cdot C_{\text{об}} \cdot t_{\text{рф}} \cdot n}{F_{\text{д}}}$$

где N_A – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{\text{об}}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР. При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т.п.;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году. При этом второй вариант позволяет получить более объективную оценку $C_{\text{ам}}$.

$t_{\text{рф}}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

Персональный компьютер.

Сроки амортизации (C_A) персонального компьютера варьируются от 2 до 3 лет. Возьмем конкретное значение $C_A=2.5$ года, тогда $H_A = \frac{1}{C_A} = 0,4$.

$$F_d = 298 \cdot 8 = 2384$$

Балансовая стоимость единицы оборудования с учётом ТЗР:

$$Ц_{ОБ} = 160000 \text{руб}$$

Фактическое время работы оборудования:

$$t_{рф} = 762,24$$

Тогда для ПК амортизация равна:

$$C_{АМ} = \frac{0,4 \cdot 53000 \cdot 762,24 \cdot 1}{2384} = 6778,31 \text{руб}$$

Сроки амортизации (C_A) фрезерного станка варьируются от 7 до 10 лет. Возьмем конкретное значение $C_A=8$ лет, тогда $H_A = \frac{1}{C_A} = 0,125$.

Действительный годовой фонд времени работы берётся из ОНТП15-94, таблица 4:

$$F_d = 2000 \text{ч}$$

Балансовая стоимость единицы оборудования с учётом ТЗР:

$$Ц_{ОБ} = 53000 \text{руб}$$

Для определения фактического времени работы обратимся к таблице 17, пункт 8. Так как нарезание планируется на двух станках, отведённое время делим пополам.:

$$t_{рф} = \frac{T_{РДи} \cdot 8}{2} = \frac{6,96 \cdot 8}{2} = 27,84 \text{ч}$$

Тогда для фрезерного станка амортизация равна:

$$C_{АМ} = \frac{0,125 \cdot 160000 \cdot 27,84 \cdot 1}{2000} = 278,4 \text{руб}$$

Сроки амортизации (C_A) металлообрабатывающего станка с ЧПУ варьируются от 7 до 10 лет. Возьмем конкретное значение $C_A=8$ лет, тогда $H_A = \frac{1}{C_A} = 0,125$.

Действительный годовой фонд времени работы берётся из ОНТП15-94, таблица 4:

$$F_D = 3800\text{ч}$$

Балансовая стоимость единицы оборудования с учётом ТЗР:

$$Ц_{ОБ} = 10000000\text{руб}$$

Фактическое время работы оборудования:

$$t_{рф} = 27,84\text{ч}$$

Тогда для станка с ЧПУ амортизация равна:

$$C_{AM} = \frac{0,125 \cdot 10000000 \cdot 27,84 \cdot 1}{3800} = 9157,89 \text{ руб}$$

Сроки амортизации (C_A) контрольно-измерительной машины варьируются от 5 до 7 лет. Возьмем конкретное значение $C_A=5$ лет, тогда $H_A = \frac{1}{C_A} = 0,2$.

Действительный годовой фонд времени работы берётся из ОНТП15-94, таблица 4:

$$F_D = 3800\text{ч}$$

Балансовая стоимость единицы оборудования с учётом ТЗР:

$$Ц_{ОБ} = 2548000\text{руб}$$

Фактическое время работы оборудования:

$$t_{рф} = 90,24$$

Тогда для КИМ амортизация равна:

$$C_{AM} = \frac{0,2 \cdot 2248000 \cdot 90,24 \cdot 1}{3800} = 12101,66 \text{ руб}$$

Итого:

$$C_{AM} = 6778,31 + 278,4 + 9157,89 + 12101,66 = 28316,26\text{руб}$$

2.3.2.3 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и исполнителя (в его роли выступает студент), а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Оклад исполнителя принимается равным окладу младшего научного сотрудника кафедры, на которой проходили обучение.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где: $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя и магистранта рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб},$$

где: $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где: Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

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

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. $F_d=1790$ рабочих дней.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_b \cdot (k_{пр} + k_d) \cdot k_p$$

, где: Z_6 – базовый оклад, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда);

$k_д$ – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда);

$k_р$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в табл. 28.

Таблица 28 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Z_6 , руб.	$k_{пр}$	$k_д$	$k_р$	$Z_м$, руб	$Z_{дн}$, руб.	$T_р$, раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	16 751,29	1,2	1,1	1,3	50086,36	291	38	11058
Инженер	7 864,11	1,2	1,1	1,3	23513,69	136,62	122	16667,64
Итого								27725,64

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн},$$

где: $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты;

$Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб.

Таблица 29 – Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата	11058	16667,64
Дополнительная зарплата	1105,8	1666,76
Итого по статье $C_{зп}$	30498,2	

Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}),$$

где: $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot 30498,2 = 9149,46 \text{ руб.}$$

2.3.2.4 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{накл} = k_{накл} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}),$$

где: $k_{накл}$ – коэффициент накладных расходов.

$$C_{накл} = k_{накл} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,8 \cdot 30498,2 = 24398,8 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости проведения исследований. Все данные сведены в таблицу 30.

Таблица 30 – Группировка затрат по статьям

Наименование статей затрат	Сумма, руб.
Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты	4037,25
Амортизационные отчисления	28316,26
Основная заработная плата	27725,64
Дополнительная заработная плата	2772,56
Отчисления на социальные нужды	9149,46
Накладные расходы	24398,8
Итоговая плановая себестоимость	96399,97

2.3.3 Матрица ответственности

Для распределения ответственности между участниками проекта формируется матрица ответственности.

Степень участия в проекте может характеризоваться следующим образом:

- ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход;
- исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта;
- утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение).

Таблица 31 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Инженер (магистрант)	Руководитель проекта
Составление и утверждение технического задания	И	О
Постановка задачи	И	О
Определение последовательности и сроков выполнения задачи	И	О
Изучение публикаций по теме	И	О

Продолжение таблицы 31

Анализ программ-аналогов	И	У
Разработка модели червячного колеса	И	У
Разработка управляющей программы для нарезания колеса на станке с ЧПУ	И	У
Нарезание червячного колеса двумя способами	И	У
Разработка схем сравнения и контроля	И	У
Сравнение профилей колёс, контроль	И	У
Оформление расчётно-пояснительной записки	И	О
Подведение итогов	И	О

2.3.4 Оценка экономической эффективности проекта

Актуальным аспектом качества выполненного проекта является экономическая эффективность его реализации, т.е. соотношение обусловленного ей экономического результата (эффекта) и затрат на разработку проекта. Так как последние являются единовременными, то мы имеем дело с частным случаем задачи оценки экономической эффективности инвестиций, т.е. вложением денежных средств в предприятие, организацию, отраслевую, региональную социально-экономическую систему и т.п. с целью получения определенного результата в будущем. Отличительными особенностями инвестиций, особенно когда речь идет о вложениях в нематериальные активы в форме НИР являются:

- результат может быть получен в течение ряда последующих лет в общем случае – на протяжении жизненного цикла создаваемой системы;
- результаты инвестиций содержат элементы риска и неопределенности;
- связывание на некоторое время финансовых средств инвестора.

Однако в данной работе провести оценку экономической эффективности проекта не представляется возможным.

2.3.5 Оценка научно-технического уровня НИР

Научно-технический уровень характеризует влияние проекта на уровень и динамику обеспечения научно-технического прогресса в данной

области. Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности, планируемых и выполняемых НИР, используется метод балльных оценок. Балльная оценка заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале присваивается определенное количество баллов. Обобщенную оценку проводят по сумме баллов по всем показателям. На ее основе делается вывод о целесообразности НИР.

Сущность метода заключается в том, что на основе оценок признаков работы определяется интегральный показатель (индекс) ее научно-технического уровня по формуле:

$$K_{НТУ} = \sum_{i=1}^3 R_i \cdot n_i,$$

где $K_{НТУ}$ – интегральный индекс научно-технического уровня;

R_i – весовой коэффициент i -го признака научно-технического эффекта;

n_i – количественная оценка i -го признака научно-технического эффекта, в баллах.

Таблица 32 – Оценка научно-технического уровня НИР

Значимость	Фактор НТУ	Уровень фактора	Выбранный балл	Обоснование выбранного балла
0,4	Уровень новизны	Относительно новая	4	Создаст возможности для расширения производства и уменьшения себестоимости изготовления червячной пары
0,1	Теоретический уровень	Разработка способа	6	Создана параметризованная модель червячного колеса для обработки на станке с ЧПУ

Значимость	Фактор НТУ	Уровень фактора	Выбранный балл	Обоснование выбранного балла
0,5	Возможность реализации	В течение первых лет	8	Востребовано в единичном и м/с производстве, особенно крупномодульных колёс

$$K_{НТУ} = 0,4 \cdot 4 + 0,1 \cdot 6 + 0,5 \cdot 8 = 6,2$$

Таким образом, исходя из данных таблицы 33, данный проект имеет средний уровень научно-технического эффекта.

Таблица 33 – Оценка уровня научно-технического эффекта

Уровень НТЭ	Показатель НТЭ
Низкий	1-4
Средний	4-7
Высокий	8-10

2.3.6 Реестр риска проектов

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

Таблица 34 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Организационный	Срыв поставок материала	3	3	Средний	Найти надежных поставщиков	Истечение срока договора
2	Экономический	Снижение финансирования	4	4	Средний	Найти материалы по низкой цене	Экономический кризис
3	Технический	Отсутствие необходимого ПО	2	2	Низкий	Использование наиболее широко используемого ПО	Недостаточно мощные компьютеры

2.4. Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}},$$

где I_{Φ}^p - интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p$$

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов; a_i – весовой коэффициент i -го параметра;

b_i^a, b_i^p – балльная оценка i -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Таблица 35 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	3
Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,20	5	3
Помехоустойчивость	0,05	4	4
Энергосбережение	0,05	2	3
Надежность	0,2	4	5
Материалоемкость	0,25	3	3
ИТОГО	1	21	19

$$I_{\text{ТП}} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,05 + 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,25 = 4,1;$$

$$I_{\text{Аналог}} = 3 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,05 + 3 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,25 = 3,45.$$

Интегральный показатель эффективности разработки ($I_{\text{финр}}^p$) и аналога ($I_{\text{финр}}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{ф}}^p}, \quad I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\text{ф}}^a}.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a},$$

где $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ - сравнительная эффективность проекта;

Таблица 36 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1,03	0,87
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,45	4,1
3	Интегральный показатель эффективности	3,35	5,41
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,62	

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах, т.к. значение меньше единицы, но больше нуля.

При сравнении значений интегральных показателей эффективности разработки и аналога, можно сделать вывод, что нарезание колёс на станке с ЧПУ более эффективно

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ЛМ61	Ларионова Людмила Владимировна

Школа	ИШНПТ	Отделение	Материаловедение
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	150401/Машиностроение

Тема дипломной работы: «Моделирование червячного колеса для обработки на станке с ЧПУ».

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования и области его применения	Объектом исследования является участок цеха находящаяся в 16 корпусе, в котором производится обработка детали, а также содержащиеся в данном цеху станки и сопутствующее оборудование.
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность	<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Микроклимат • Повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны; • Повышенный уровень шума на рабочем месте; Повышенный уровень вибрации; • Недостаточная освещенность рабочей зоны; <p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> • механические опасности (источники, средства защиты); • термические опасности (источники, средства защиты) • электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита - источники, средства защиты); • пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения);
2. Экологическая безопасность	<ul style="list-style-type: none"> • Защита селитебной и других зон окружающей среды; • Анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы: абразивная пыль); • Анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы: СОЖ); • Анализ воздействия объекта на литосферу (отходы: стружка, бумага); • Разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.

3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	<ul style="list-style-type: none"> • Перечень возможных ЧС на объекте: сильные морозы, диверсия; • Выбор наиболее типичной ЧС; • Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; • Разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; • Разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	<ul style="list-style-type: none"> • Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; • Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
Перечень графического материала:	<ul style="list-style-type: none"> • План эвакуации • План размещения светильников на потолке рабочего помещения

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	26.02.2018
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		26.02.2018

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ61	Ларионова Людмила Владимировна		

Введение

В данном разделе ВКР рассмотрены вопросы, связанные с техникой производственной безопасности и охраной окружающей среды. Основной целью данного раздела является выявление опасных факторов промышленного производства, создание оптимальных норм для улучшения условий труда, обеспечения производственной безопасности человека, сохранения работоспособности в процессе деятельности, а также охраны окружающей среды. Вопросы производственной и экологической безопасности рассматриваются на основе разработки модели червячного колеса и его нарезания. Материал, из которого производится колесо – капролон. Обработка производится на станке ФУ25 и на станке с ЧПУ DMU50. Разработка модели колеса велась с использованием ЭВМ. Основным местом проведения работы является 103 аудитория 16 «А» корпуса НИ ТПУ. Производственная среда, организация рабочего места должны соответствовать общепринятым и специальным требованиям техники безопасности, эргономики, нормам санитарии, экологической и пожарной санитарии.

3.1 Анализ вредных и опасных факторов

Производственным риском будем считать опасные и вредные производственные факторы, воздействующие на человека. При рассмотрении опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ) будем руководствоваться ГОСТ 12.0.003-91. ОВПФ делятся на четыре группы: физические, химические, биологические и психофизические. В металлообрабатывающих цехах встречаются все четыре группы ОВПФ. На проектируемом участке особенно обширна группа физических факторов. Неблагоприятные факторы могут возникать от:

- движущегося межцехового или внутрицехового транспорта;
- повышенной запыленности рабочей зоны;
- повышенного уровня шума и вибрации на рабочем месте;

- воздействия на человека исходного материала заготовок и готовых деталей (наличие острых кромок, выступов и заусенцев);
- технического состояния оборудования (движение незащищенных органов, неисправности, отклонение от транспортных режимов работы);
- помещения участка (неблагоприятный пол, проливы масел, узкие проходы, неубранные отходы);
- самих рабочих (низкая квалификация, монотонность, физические перегрузки)

Результаты анализа ОВПФ сведены в таблицу 37.

Таблица 37 Опасные и вредные факторы при выполнении работ по разработке модели червячного колеса для нарезания на ЧПУ

Наименование видов работ	Факторы по ГОСТ 12.0.003-74	
	Вредные	Опасные
Нарезание червячного колеса с использованием металлообрабатывающего оборудования	<ul style="list-style-type: none"> • Повышенная запылённость воздуха рабочей зоны • Повышенный уровень шума • Повышенный уровень вибрации • Недостаточная освещённость рабочей зоны • Прямая и отражённая блёсткость • Повышенный уровень статического электричества • Монотонность труда 	<ul style="list-style-type: none"> • Движущиеся машины и механизмы, подвижные части производственного оборудования передвигающиеся изделия, заготовки и материалы • Поражение электрическим током, при работе оборудования • Острые кромки, заусенцы и шероховатость на поверхностях заготовок, инструментов и оборудования;

Так же в процессе разработки модели колеса большое количество времени работа велась с использованием ПЭВМ. В ходе работы с ПЭВМ возможно повышение температуры его рабочих поверхностей. Причинами

могут являться скопление пыли в системном блоке, плохой контакт между отдельными элементами, высыхание термопасты, плохая работа система охлаждения компьютера. Так же опасность представляют электромагнитные излучения монитора, диапазон частот которых составляет 20 Гц -300 МГц и статический заряд на экране. Неправильная настройка параметров дисплея может привести к быстрой утомляемости и снижению зрения. В процессе работы над данным проектом предполагается осуществлять множество повторяющихся действий, монотонность работы так же относится к вредным факторам. Работники ПЭВМ испытывают длительные статические нагрузки, что приводит к напряжению в спине. Так же распространённым профессиональным заболеванием является туннельно-лучевой синдром, который возникает от длительного однообразного положения кисти. Для работы с ПЭВМ существует следующая типовая инструкция: ТОИ Р 01-00-01-96 «Типовая инструкция по охране труда для операторов и пользователей персональных электронно-вычислительных машин (ПЭВМ) и работников, занятых эксплуатацией ПЭВМ и видеодисплейных терминалов (ВДТ)». Работа оператора ПЭВМ относится к категории работ, связанных с опасными и вредными условиями труда.

3.2 Микроклимат

Состояние микроклимата на механическом участке должна соответствовать допустимым нормам по ГОСТ 12.1.005-88. Метеорологические условия в производственных условиях определяются следующими параметрами:

- температура воздуха t , °С;
- относительная влажность воздуха ϕ , %;
- скорость движения воздуха на рабочем месте v , м/с.

Движение воздуха в помещениях – это важный фактор, влияющий на тепловое самочувствие человека. Движение воздуха оказывает различное

действие на организм в тёплый и холодный период года. Так, в жарком помещении оно улучшает состояние организма, так как способствует увеличению отдачи теплоты, но при низкой температуре оказывает неблагоприятное воздействие. Можно сделать вывод, что для теплового самочувствия человека важно определенное сочетание температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне

Работы делятся на три категории тяжести на основе общих энергозатрат организма. Работа, относящаяся к инженерам к операторам, относится к категории средних работ, 2б – работы, связанные с ходьбой, перемещением и переноской тяжестей до 10 кг и сопровождающиеся умеренным физическим напряжением. Допустимые значения микроклимата для этого случая даны в таблице 38.

Таблица 38 – Результаты замеров микроклимата

Период года	Категория работ	Температура, С°		Влажность, %		Скорость воздуха, м/с	
		Фактич.	Допуст.	Фактич.	Допуст.	Фактич.	Допуст.
Теплый	2б	21	18-27	62	65	0,16	0,2
Холодный	2б	18	17-23	53	<75	0,1	0,2

Для обеспечения комфортных условий используются как организационные методы (рациональная организация проведения работ в зависимости от времени года и суток, чередование труда и отдыха), так и технические средства: в холодный период года – применение водяного отопления; в теплый период года – искусственной вентиляцией, изоляцией нагретых поверхностей оборудования.

3.3 Вредные вещества

При анализе вредных выделений на участке выявлены следующие вредные вещества: масло минеральное, окись железа. На проектируемом участке концентрация загрязняющих элементов соответствует санитарным нормам ПДК по ГОСТ 12.1.005 – 88. Данные о содержании вредных выделений представлены в таблице 39.

Таблица 39– Результаты замеров вредных выделений

Наименование вещества	Макс.	Номин.	ПДК	Класс опасности	Агрегатное состояние
Окись железа	3,6	3,2	6	4	Аэрозоль
Масла минеральные	2,1	1,9	5	3	Аэрозоль

Очистка воздуха от загрязнения осуществляется с помощью фильтров и приточной – вытяжной вентиляцией. Вентиляция производственных помещений предназначена для уменьшения запыленности, задымленности и очистки воздуха от вредных выделений производства, а также для сохранности оборудования. Она служит одним из главных средств оздоровления условий труда, повышения производительности и предотвращения опасности профессиональных заболеваний. Проветривание помещения проводят, открывая форточки. Проветривание помещений в холодный период года допускается не более однократного в час, при этом нужно следить, чтобы не было снижения температуры внутри помещения ниже допустимой. Воздухообмен в помещении можно значительно сократить, если улавливать вредные вещества в местах их выделения, не допуская их распространения по помещению. Для этого используют приточно-вытяжную вентиляцию.

3.4 Производственный шум

Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума - это уровень фактора, который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений. Соблюдение ПДУ шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

Шум ухудшает условия труда, оказывая вредное действие на организм человека. Основное физиологическое воздействие шума заключается в повреждении внутреннего уха. Работающие в условиях длительного шумового

воздействия испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, боли в ушах и т. д. Такие нарушения в работе ряда органов и систем организма человека могут вызвать негативные изменения в эмоциональном состоянии человека вплоть до стрессовых. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением. Длительное воздействие шума, уровень которого превышает допустимые значения, может привести к заболеванию человека шумовой болезнью — нейросенсорная тугоухость. Все это снижает работоспособность человека и его производительность, влияет на качество и безопасность труда.

Допустимый уровень шума ограничен ГОСТ 12.1.003-83 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002. Максимальный уровень звука постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 80 дБА.

При значениях выше допустимого уровня необходимо использование СКЗ и СИЗ.

Средства коллективной защиты:

- устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
- изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения (пенобетон; базальтовая, минеральная, хлопковая вата; шумопоглощающие экраны из фанеры, древесноволокнистые плиты, звуконепроницаемые ткани);
- применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения.

Средства индивидуальной защиты:

- применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

3.5 Освещение

Согласно СНиП 23-05-95 в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 150 Лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда. На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина помещения $A = 10$ м, ширина $B = 7$ м, высота = 3,5 м. Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 1$ м.

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами без штор $\rho_c = 70\%$, чистого бетонного потолка $\rho_{\text{п}} = 50\%$. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений со средним выделением пыли равен $K_z = 1,5$. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z = 1,1$.

Выбираем лампу ЛХБ-40, световой поток которой равен $\Phi_{\text{лд}} = 2700$ Лм.

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-40. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1227 мм, ширина – 265 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем $\lambda = 1,2$, расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,5 = 2 \text{ м.}$$

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{10 \cdot 7}{2 \cdot (10 + 7)} = 2,05$$

Коэффициент использования светового потока $\eta = 0,52$.

Потребные группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$n = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi_{\Pi} \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 10 \cdot 7 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2700 \cdot 0,52} \approx 12,3 = 12 \text{ ламп}$$

Так как в каждом светильнике по две лампы, то общее число светильников: $n = 6$.

Размещаем светильники в 2 ряда по 5 светильника.

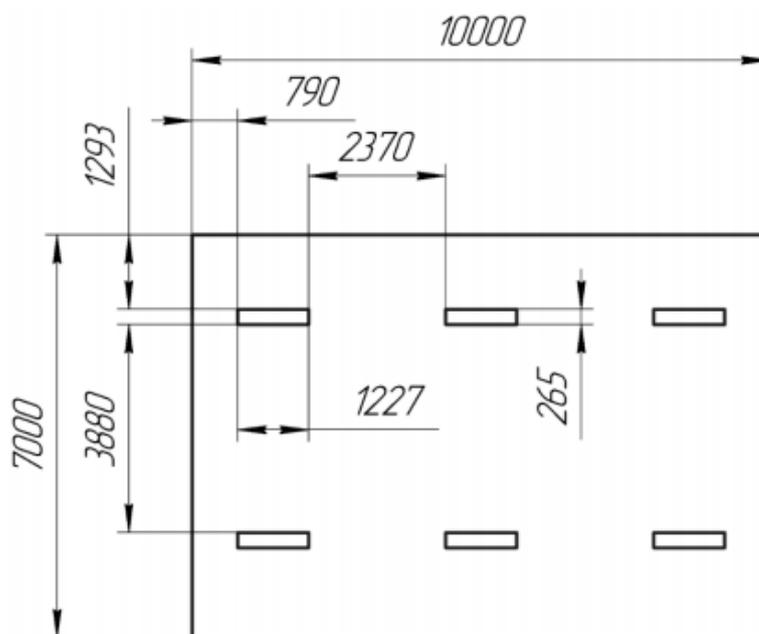


Рисунок 55. План размещения светильников в помещении
 Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле:

$$\frac{2}{3}L_1 + 4L_1 + 3 \cdot 1227 = 10000\text{мм}$$

$$L_1 = 2370\text{мм}$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$\frac{2}{3}L_2 + L_2 + 2 \cdot 265 = 7000$$

$$L_2 = 3880$$

Расчет светового потока группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_p = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{n \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 10 \cdot 7 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,52} = 2776\text{лм}$$

Проверяем выполнение условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} 100\% \leq 20\%;$$

$$\frac{2700 - 2776}{2700} \cdot 100 \approx -3\%$$

$-10\% \leq -3\% \leq 20\% \sim$ условие выполнено.

3.6 Электробезопасность

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Лаборатория относится к II классу электроопасности - помещению с повышенной опасностью, которая характеризуется наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: сырость, токопроводящая пыль, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.), высокая температура, возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям, технологическим аппаратам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой. Токарный станок работает в сети с напряжением 380 В.

В лаборатории применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений (кожухов, крышек, сеток и т.д.), расположения токоведущих частей на недоступной высоте. Станки и оборудование оснащены заземлителями. Средствами индивидуальной защиты от поражения электрическим током являются инструменты с ручками из изолирующего материала, специальные перчатки и обувь, а также дорожки и коврики.

3.7 Пожаровзрывобезопасность

Пожарная безопасность предусматривает обеспечение безопасности людей и сохранения материальных ценностей предприятия на всех стадиях его жизненного цикла. Основными системами пожарной безопасности являются

системы предотвращения пожара и противопожарной защиты, включая организационно-технические мероприятия.

Помещение, в котором осуществляется процесс изготовления изделия, по взрывопожарной и пожарной опасности относится к категории Д: негорючие вещества и материалы находятся в холодном состоянии. Тем не менее, никогда не стоит забывать об опасности возникновения пожара. Среди организационных и технических мероприятий, осуществляемых для устранения возможности пожара, выделяют следующие меры:

- использование только исправного оборудования;
- проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- назначение ответственного за пожарную безопасность помещения;
- отключение электрооборудования, освещения и электропитания по окончании работ;
- курение в строго отведенном месте;
- содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

В помещении необходимо иметь 2 огнетушителя марки ОП-5, исходя из размеров помещения, а также силовой щит, который позволяет мгновенно обесточить помещение. Огнетушители должны всегда содержаться в исправном состоянии, периодически осматриваться, проверяться и своевременно перезаряжаться. Желательно помещать на стенах инструкции по пожарной безопасности и план эвакуации в случае пожара. В случаях, когда не удастся ликвидировать пожар самостоятельно, необходимо вызвать пожарную охрану и покинуть помещение, руководствуясь разработанным и вывешенным планом эвакуации.

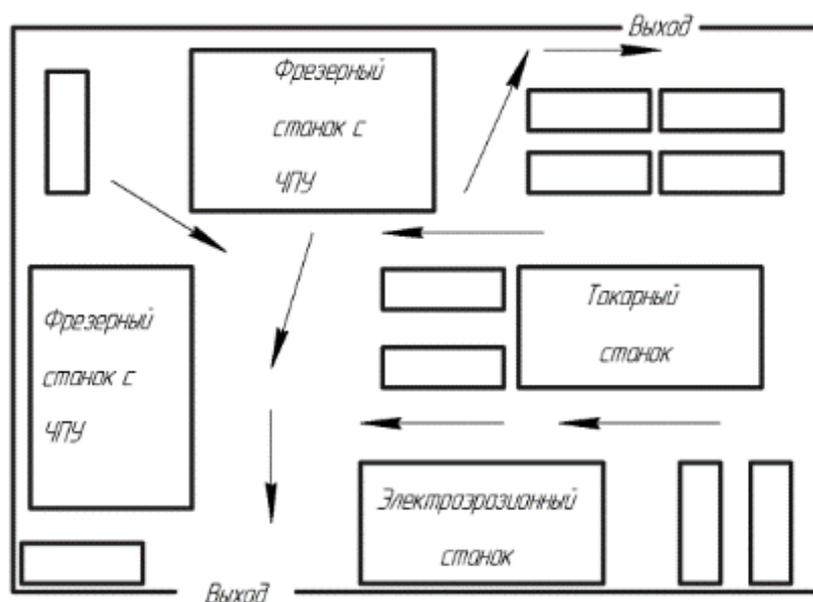


Рисунок 56. План эвакуации аудитории 103

3.8 Экологичность

Охрана окружающей среды – это комплексная проблема и наиболее активная форма ее решения – это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства. Охрана природы — комплекс государственных, международных и общественных мероприятий, направленных на рациональное использование природы, восстановление, улучшение и охрану природных ресурсов. Окружающий человека воздух непрерывно подвергается загрязнению. Воздух производственных помещений загрязняется выбросами технологического оборудования или при проведении технологических процессов. Удаляемый из помещений вентиляционный воздух может стать причиной загрязнения воздуха промышленных площадок и населенных мест. Средства защиты атмосферы должны ограничивать наличие вредных веществ в воздухе среды обитания человека не выше ПДК. В тех случаях, когда реальные выбросы выше этого уровня, необходимо использовать аппараты для очистки газов от примесей. Данная магистерская работа не представляет опасности для экологической обстановки, поскольку отсутствует использование токсичных материалов. Все операции являются

сугубо механическими, без выделения вредных газов и веществ, однако, в процессе обработки снимается слой стружки, которая должна правильно утилизироваться для переработки. Стружку необходимо очистить от металлических вкраплений, спрессовать и отправить на переработку в соответствующую фирму. Ртутные лампы сдать на утилизацию. Смазочно-охлаждающую жидкость фильтровать и вернуть в цикл, взвеси собрать и сдать в строительную или дорожную промышленность в качестве инертного материала.

3.9 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Лаборатория находится в городе Томск с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т.д.) в данном городе отсутствуют. Возможными ЧС могут быть: природного характера – сильные морозы, техногенного характера – шпионаж, диверсия. Критически низкие температуры могут привести к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, приостановке работы, обморожениям и даже жертвам среди населения. В случае заморозки труб в лаборатории предусмотрены запасные электрообогреватели. Электропитание для обогревателей обеспечивает генератор. Данное оборудование хранится на складе и их техническое состояние постоянно проверяется.

Чрезвычайные ситуации, возникающие в результате диверсий, возникают все чаще. В большинстве случаев такие угрозы оказываются ложными, однако, работы в данном случае все равно прекращаются. Для

предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключить распространение информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица обязаны раз в полгода проводить тренировки по отработке действий на случай ЧС.

Законодательные акты

1. ОСТ 54 30013-83 Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности
2. ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
3. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)».
4. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
5. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
6. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
7. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
8. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
9. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
10. ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности.
11. СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха

12. ГОСТ 30775-2001. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов.
13. СНиП 21-01-97. Противопожарные нормы.
14. СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение»

Графические материалы

1. План размещения светильников в помещении
2. План эвакуации из аудитории 103

Заключение

В данной работе были рассмотрены программы, позволяющие сгенерировать зубчатые колёса. В существующих программных продуктах возможно получить большинство видов зубчатых колёс. Однако моделирование червячного зацепления имеет некоторые трудности, поэтому функция генерации червячных колёс в большинстве программ отсутствует. Кроме того, рассмотренные программы нуждаются в русификации. Возникает сложность перехода от питчевой системы к метрической.

В связи с вышеперечисленным были разработаны четыре модели червячного колеса: сгенерированное встроенной библиотекой *КОМПАС-3D*, рассчитанное по базовым формулам эвольвентного зацепления, полученное имитацией метода обката вычитанием плоских сечений и вычитанием тела. Все модели сравнили друг с другом. Поверхности моделей, полученных имитацией метода обката, совпали.

На координатно-измерительной машине были проверены на соответствие реальному червячному колесу четыре модели колеса. Модели, полученные первыми двумя способами, не обеспечивают правильную геометрию поверхности впадины. Это связано с тем, что расчёт кривой, образующей боковую поверхность зуба проводился только для одного центрального сечения. Для получения верной поверхности впадины червячного колеса надо имитировать метод обката. У моделей червячных колёс, спроектированных таким методом, среднее отклонение от реального колеса составляет 0,051мм для полученного вычитанием плоских сечений колеса и 0,089мм для полученного вычитанием тела червяка. Исходя из возможности уменьшения трудоёмкости для дальнейшей работы выбираем модель колеса, построенную вычитанием тела червяка.

В будущем планируется параметризировать выбранную модель. Так как модель содержит большое количество повторяющихся действий, для уменьшения трудоёмкости будет написан макрос.

Список используемых источников

1. ГОСТ 18498-89 ПЕРЕДАЧИ ЧЕРВЯЧНЫЕ. Термины, определения и обозначения.
2. Производство зубчатых колёс: Справочник / С.Н.Калашников, А.С. Калашников, Г.И. Коган и др.; Под общ. ред. Б.А. Тайца. – 3-е изд., перераб. и допол.–М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.: ил.
3. Курсовое проектирование деталей машин/В.Н. Кудрявцев, Ю.А. Державец, И.И. Арефьев и др.; Под общей ред. В.Н. Кудрявцева: Учебное пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов.– Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. 000 с.,ил.
4. ГОСТ 2144-76. Передачи червячные цилиндрические. Основные параметры
5. Стрельников В.Н., Суков Г.С., Волошин А.И., Лесняк Г.А., Баглаенко Г.А., Нечепоренко И.Ю., Омельченко В.И., Донской Д.И. Производство крупных зубчатых и червячных колёс на универсальных станках с ЧПУ// Прогресивні технології І системи машинобудування. – 2010. – №1(39) . –с.189-194
6. Режущий инструмент: учебник для вузов / под общ. ред. С.В.Кирсанова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2014. – 520 с.: ил.
7. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1/Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова.– 4-е изд., перераб.и доп. – М.: Машиностроение, 1986. 656 с., ил.
8. Моргунов А.П., Ревина И.В. Производство зубчатых колёс: Учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. – 116с.
9. Блюмберг В. А., Зазерский Е.И. Справочник фрезеровщика. – Л.: Машиностроение, 1984. – 288 с., ил.

10. Абакумов М.М. Основы зуборезного дела. Учеб. пособие для бригадно-индивидуальной подготовки рабочих на производстве. М., «Высшая школа». 272с. с илл.
11. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. Т. 2. - 9-е изд., перераб. и доп./ под ред. И.Н. Жестковой. - М.: Машиностроение, 2006. - 960 с
12. AMP Software [Электронный ресурс]: Плущевский А.М., г. Москва. – Режим доступа: <http://ampsoftware.narod.ru/Index.htm> (дата обращения: 01.06.2018)
13. 3-D mathematical modeling of geared mechanical systems [Электронный ресурс]: Copyright Spiral Bevel Corporation. – Режим доступа: <http://spiralbevel.com/> (дата обращения: 01.06.2018)
14. Gearotic Motion [Электронный ресурс]: The Art of Mechanical Design
Режим доступа: <http://www.gearotic.com/index.html> (дата обращения: 01.06.2018)
15. Области применения платформы KISSsoft [Электронный ресурс]: Лаборатория «Вычислительная механика» (CompMechLab), Россия, Санкт-Петербург. – Режим доступа: <http://www.kisssoft.compmechlab.ru/> (дата обращения: 01.06.2018)
16. Design software for mechanical engineering applications [Электронный ресурс]: KISSsoft AG - A Gleason Company. – Режим доступа: <http://kisssoft.ag/english/home/index.php> (дата обращения: 01.06.2018)
17. Справка по SOLIDWorks. [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://help.solidworks.com/2012/Russian/solidworks/toolbox/c_Gears.htm (дата обращения: 01.06.2018)

Приложение А

Worm drive's geometry and manufacturing

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ61	Ларионова Людмила Владимировна		

Консультант отделения материаловедения ИШНПТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Ким А.Б.			

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Пичугова И. Л.			

Worm drive's geometry and manufacturing

Basics Involute gear

It is difficult to imagine machines which do not include some sort of a toothed gear system. These systems are used for the transmission of motion or power. There are few mechanical devices that do not transmit power and motion between rotating shafts.

In accordance with the orientation of axes, there are three categories of gears:

- Parallel Axes Gears
- Intersecting Axes Gears
- Nonparallel and Nonintersecting Axes Gears

Spur and helical gears are the parallel axes gears. Bevel gears are the intersecting axes gears. Screw or crossed helical, worm and hypoid gears fall into the third category.

There is almost an infinite number of curves that can be developed to satisfy the law of gearing, and many different curve forms have been tried in the past. Modern gearing is based on involute teeth. This is due to three major advantages of the involute curve:

- Conjugate action is independent of changes in center distance.
- The form of the basic rack tooth is straight-sided, and therefore is relatively simple and can be accurately made; as a generating tool it imparts high accuracy to the cut gear tooth.
- One cutter can generate all gear teeth numbers of the same module.

The fundamentals of gearing are illustrated through the spur gear tooth, both because it is the simplest, and hence most comprehensible, and because it is the form most widely used. The basic geometry and nomenclature of a spur gear mesh is shown in Figure 1.

The basic geometry and nomenclature of a spur gear mesh is shown in Figure 2. The tangent to the two base circles (radius designated r_b for pinion, R_b for gear) is

the line of contact, or line-of-action. Intersection of this line crosses with the line-of-centers establishes the pitch point, P. This in turn sets the size of the pitch circles (r, R), or as commonly called, the pitch diameters. The pitch diameter is:

$$d = mz,$$

m - module, z - number of teeth.

The ratio of the pitch diameters gives the velocity ratio. Velocity ratio of gear 2 to gear 1 is:

$$i = \frac{d_1}{d_2}$$

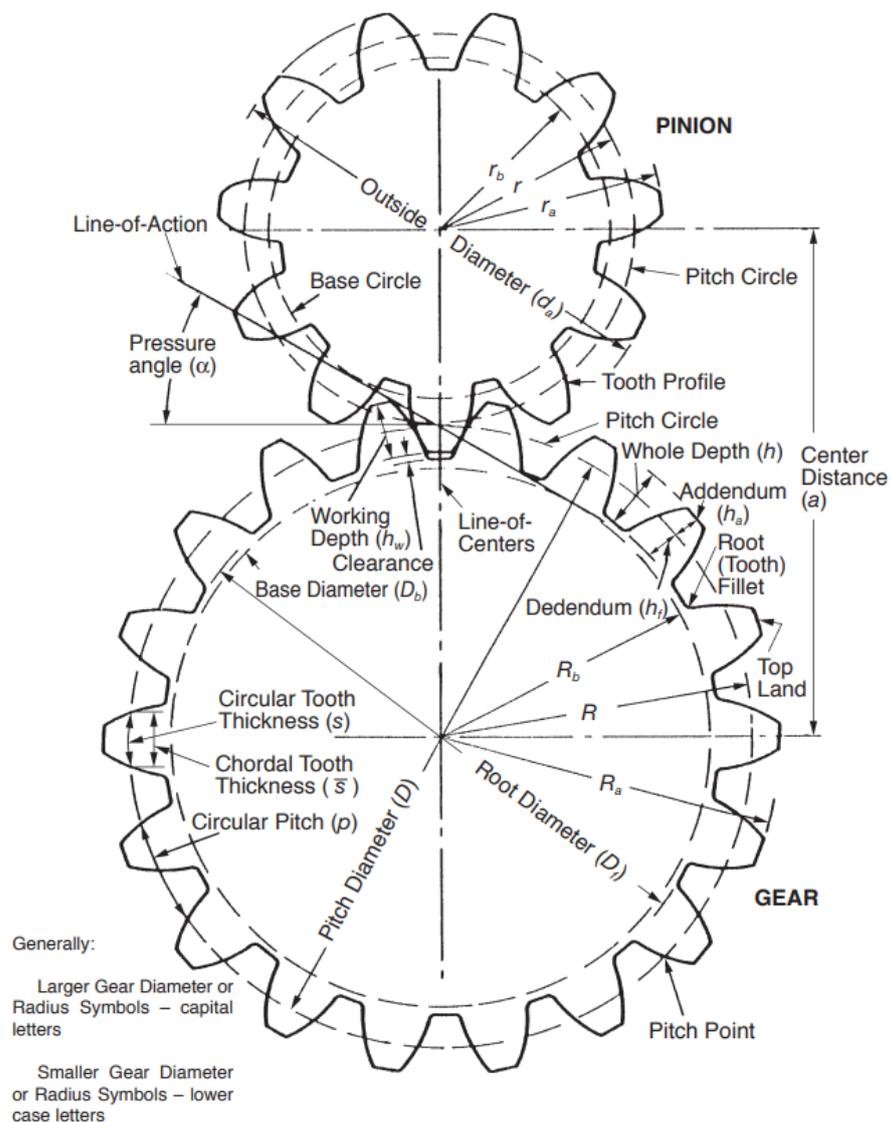


Figure 1. Basic gear geometry

The module is the length of pitch diameter per number of teeth:

$$m = \frac{d}{z}$$

Circular pitch p is used to represent tooth size when a special desired spacing is wanted. It is distance between two neighboring sides of the same profile.

$$P = \pi m$$

Center distance a is distance between centers of the mating gears.

Root diameter and outside diameter are circles passing through the bases and tops of the teeth, respectively. Diameters (radiuses) are denoted by $d_{a1}(r_{a1})$, $d_{f1}(r_{f1})$.

Circular tooth thickness s is the arc length of pitch circle enclosed between the two sides of the tooth profile.

Addendum h_a is distance between outside and pitch circle. Dedendum h_f is distance between pitch and root circle.

Root fillet is part of the tooth profile from the beginning of the involute (base circle), to the root circle.

Basics worm gearing

Worm drive includes a worm and a worm gear. The worm resembles a screw thread; and the mating worm gear is a helical gear, except that it is made to envelope the worm as seen along the worm's axis. The outstanding feature is that the worm offers a very large gear ratio in a single mesh. However, transmission efficiency is very poor due to a great amount of sliding as the worm tooth engages with its mating worm gear tooth and forces rotation by pushing and sliding. With proper choices of materials and lubrication, wear can be contained and noise is reduced.

Worm gears are the most compact type of system and provide high-ratio speed reduction. They are often the preferred type of gearing system when space is limited and large gear reductions are needed. Worm gears can be used to either greatly increase torque or greatly reduce speed. They are also the smoothest and quietest of the gear systems, as long as they are properly mounted and lubricated.

Another advantage of worm gears is that they have good meshing effectiveness. To be most effective, it is important that they are manufactured with high quality standards to ensure all gear requirements are precisely met.

Application area of worm gears is very wide. It is used in machines as an adjustment instrument, in lifts, torsen differentials, gates and conveyor belts. Adjustment instrument with worm gear differs from other known instruments – it can be tuned both upward and downward, while known instruments can be tuned only in one direction. This gear drive can often be found in the machinery of common elevators or lifts because of their compact size and non-reversible properties. As the gear cannot transmit motion back through the worm, using this type of gear can act as a secondary braking system. Typical worm drives can only be turned in one direction, which means that conveyor belts and security gates lock-up when not being used and will not run backwards. Automatic security gates will often adopt two worm drives, one to open and another to close. This means the gate can be locked in each direction and cannot be breached or forced.

Worm gearing is a special case of screw gearing with the angle of axes 90° and a low number of pinion/worm teeth (mostly $z_1=1-4$).

There are two types of worm gears - with a cylindrical and globoid worm. Pitch surface of the first type is cylinder. Pitch surface of the second type is formed by the rotation of concave part of mated worm gear's pitch circle's arc around the axis of the worm. The globoid worm drive leads to high torque consumption due to the mutually embracing shapes of the worm and worm wheel, more teeth are in action with the skrew than in the similar drive with the cylindrical worm. However, these transmissions are more difficult to manufacture, assemble and adjust. They have relatively low efficiency and a greater percentage of binding of teeth, wear out more quickly. Therefore, cylindrical worm gear is more common in the engineering industry.

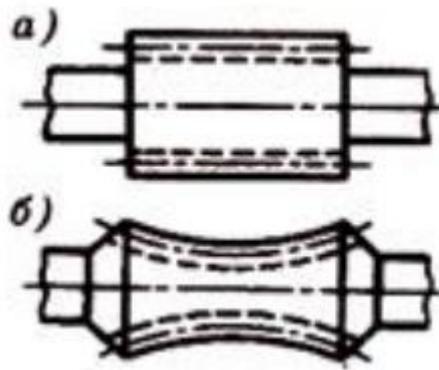


Figure 2. a) cylindrical worm; b) globoid worm

Worm gearing types are distinguished by shape as follows (Figure 3):

- Cylindrical wheel/cylindrical worm (kinematical, non-power transmissions, low torque, manual drive, adjusting mechanisms, point contact of teeth, cheap production)
- Cylindrical worm/globoid wheel – most frequent (power transmissions, compact design)
- Globoid worm/cylindrical wheel (not used)
- Globoid wheel and worm (high outputs, compact design, special production, highest quality, high price)

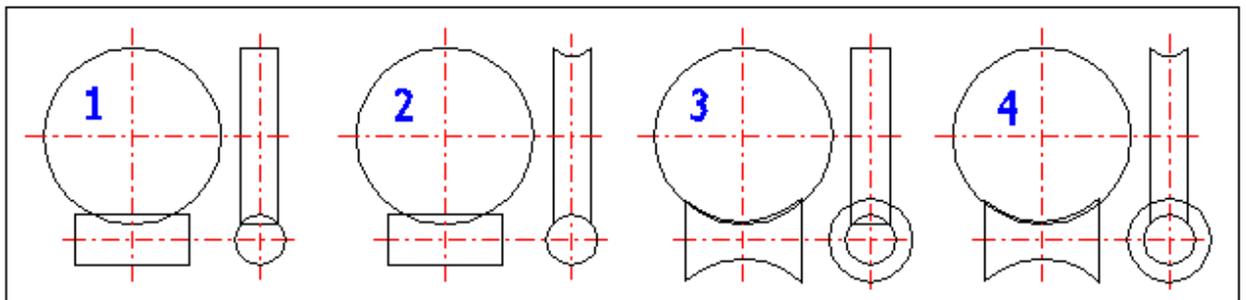


Figure 3 Worm gearing types

The following types of worms are the most common: archimedian (ZA), involute (Z1), convolute (ZN1, ZN2)

- ZA – wormgear with straight-line (trapezoidal) tooth profile in axial section; the tooth sides are slightly convex in the normal section; the cross section results in the spiral of Archimedes (Figure 4, a). The gearing is produced using lathes

or thread-cutting machines (the worm resembles a motion screw with trapezoidal threads). A tool shaped as the basic profile is applied onto the workpiece in the axial plane. With larger γ angles, different cutting angles occur in the forming tool on the lateral edges, which results in unequal cutting edge loading and wear. The lateral worm areas can only be sharpened using a special form grinding wheel. Therefore, spiral gearing is used in worms with a low pitch angle ($\gamma < 10^\circ$) in those cases when tooth sides are not treated thermally and do not require regrinding.

- ZI – worm with an involute profile (a straight-line tooth profile in a plane tangential to the main cylinder). The tooth sides are convex in both the centre-line and normal sections and the cross section results in an involute (Figure 4, b). The gearing is machined using two tools applied onto the workpiece. The tool cutting edge lies in the tangent direction towards the helix on the main cylinder. The involute gearing is used in worms with a higher number of teeth, e.g. $z_1 > 4$; the worm resembles a cylindrical gear with helical teeth. Tooth sides can be ground with the flat side of the grinding wheel; special grinding machines must be used given the relatively small angle γ .

- ZN – worm with a straight-line tooth profile in normal tooth section, namely:

- 1) On the mean helix of space
- 2) On the mean helix of tooth.

In the axial section, tooth sides are slightly convex and the cross section results in a general involute curve, in an extended or shortened involute (Figure 4, c). The gearing is worked in case 1) with one and in case 2) with two forming in the normal plane. The cutting angles are equal to angles γ . Heat treated sides can be ground using a grinding wheel with straight-line, bevel areas on thread grinding machines; this grinding process results in non-straight-line lateral areas which, however, rather approximate the theoretical ones. If the screw milling cutter is used to produce worm gear, toothing is subject to this grinding process, the worm and the worm gear create a theoretically proper pair. The common gearing is also suitable for

worms with greater angles γ and for worms with thermally treated tooth sides that require regrinding.

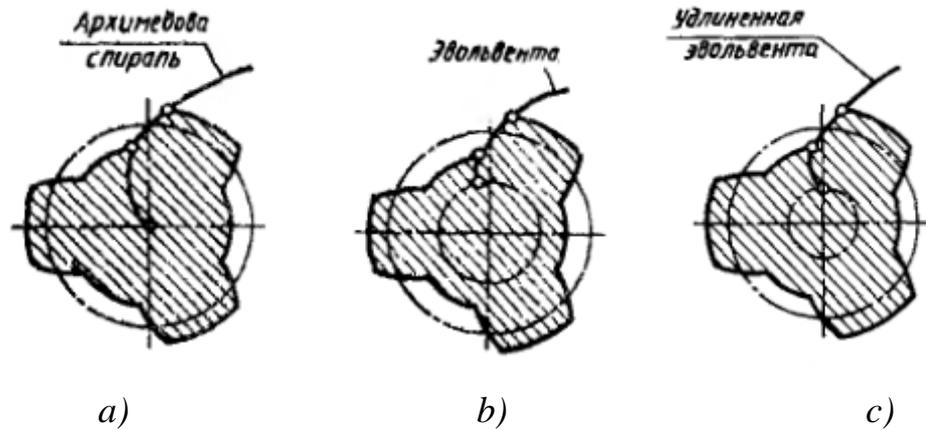


Figure 4 Types of cylindrical wormskrews

Archimedian worms are the most simple in manufacturing, so they are most common among cylindrical worms.

To internal of the worm, the worm-gear has a curved-shaped tooth; it increases the length of the contact lines in the band of contact. Basic geometry of the worm gear is illustrated Figure 5:

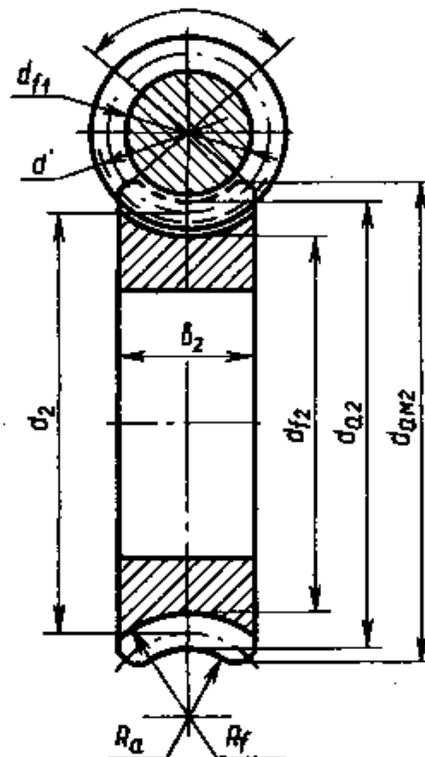


Figure 5. Geometry of a worm drive

- Worm gear's pitch diameter d_2
- Worm gear's root diameter d_{f2}
- Worm gear's throat diameter d_{a2}
- Worm gear's outside diameter d_{aM2}
- Worm gear face width b_2
- Worm gear's throat surface radius R_a
- Worm gear's root surface radius R_f

Formulas for calculating the geometrics of a worm gear and a worms are shown in Table 1.

Table 1 Formulas for calculation worm drive geometrics

Wormskrew's pitch diameter	d_1	$m \cdot q$
Wormskrew's throat diameter	d_{a1}	$d_1 + 2m$
Wormsrew's addendum	h_{a1}	$m h_{a1}$
Wormsrew's dedendum	h_{f1}	For ZA and ZN $h_{f1} = 1.2m$, for Z $h_{f1} = (2,2\cos\gamma - 1)m$
Worm's root diameter	d_{f1}	$d_1 - 2h_{f1}$
Circular pitch	P	πm
Pitch angle	γ	$\arctg\left(\frac{z_1}{q}\right)$
Worm face width	b_1	$2 \sqrt{\left(\frac{d_{aM2}}{2}\right)^2 - \left(a_w - \frac{d_{a1}}{2}\right)^2} + \frac{\pi m}{2}$
Addendum modification coefficient	x	$x = \frac{a_w}{m} - \frac{q + z_2}{2}$
Worm gear's pitch diameter	d_2	$m \cdot z_2$
Worm gear's throat diameter	d_{a2}	$d_2 + 2m(1 + x)$
Worm gear's root diameter	d_{f2}	$d_2 - 2m(1.2 + x)$
Worm gear's outside diameter	d_{aM2}	$\leq d_{a2} + \frac{6m}{z_1 + 2}$

Worm gear face width	b_2	for $z_1 \leq 3$ $b_2 \leq 0.75d_{a1}$, for $z_1 \leq 3 = 4$ $b_2 \leq 0.67d_{a1}$
Worm gear's radius of cave face surface	R_a	$0.5d_1 - m$
Centre-line distance	a_w	$0.5m(q + z_2 + 2x)$

Worm gear manufacturing

Gear cutting is any machining process for creating a gear. The most common gear-cutting processes include hobbing, broaching, milling, and grinding

Copying method

Gear may be cut on a milling machine using a numbered gear cutter, and an indexing head or rotary table. The number of the gear cutter is determined by the tooth count of the gear to be cut. Cutting is done by taking a blank gear and rotating a cutter, with the desired tooth pattern, around its periphery. This ensures that the gear will fit when the operation is finished. The downside of this method is tip of tooth undercutting δ_1 and δ_{11} , increasing with the increase of pitch angle and the difference between the parameters of the involute gear cutter and wormskrew mated with this gear. So this method is not recommended for worm gears that have pitch angle more than 6-8 °.

This method is used only for roughing. For finishing gear cutting hobbing cutter is used. This method has low efficiency. It is used when a gear-cutting machine is not available.

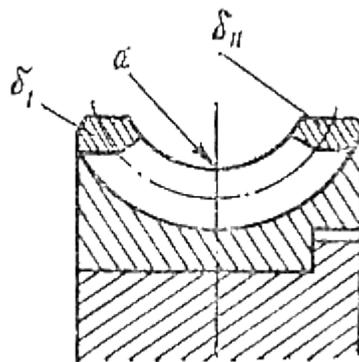


Figure 6. Tooth undercutting of worm gear

For worm gear milling is an involute side milling cutter with diameter equal or smaller than wormskrew's tip diameter used. It is set in the spindle using an arbor. Worm gear is fixed on indexing head, spindle, machine bench is rotated by the lead. It is necessary to take into account the hand of helix of worm mated with the wheel. If the gear meshes with the left worm, the table should be rotated clockwise, if the right – anticlockwise. The depth of milling is assigned depending on the worm drive's center-line distance, taking into account the dimensional allowance for finishing. After the milling machine bench is lowered until the cutter exit from the cavity. The workpiece is rotated by one tooth with the help of indexing head, then the next tooth slot is milled.

Generating method

Hobbing is a method by which a hob is used to cut teeth on a blank. The cutter and gear blank are rotated at the same time to transfer the profile of the hob onto the gear blank. The hob must make one revolution to create each tooth of the gear. This method is used very often for all sizes of production runs, but works best for medium to high batch production. The main advantage of this process is its versatility to produce a variety of gears including Spur, Helical, Worm Wheels, Serrations, Splines, etc. The main advantage of the method is the higher productivity rate of the gears.

The gear blank is mounted on a vertical arbor. The hob is mounted in a rotating arbor. The hob axis is tilted through the hob lead angle so that its teeth are parallel to the axis of the gear blank.

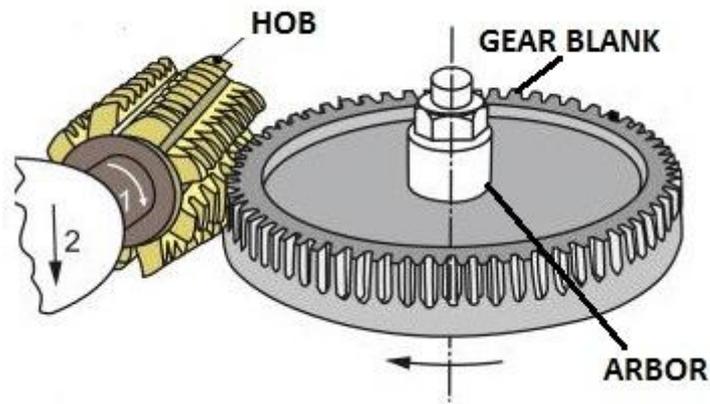


Figure 7 Gear hobbing

In this case, the involute profile of tooth is generated by a variety of different positions of the rectilinear profile

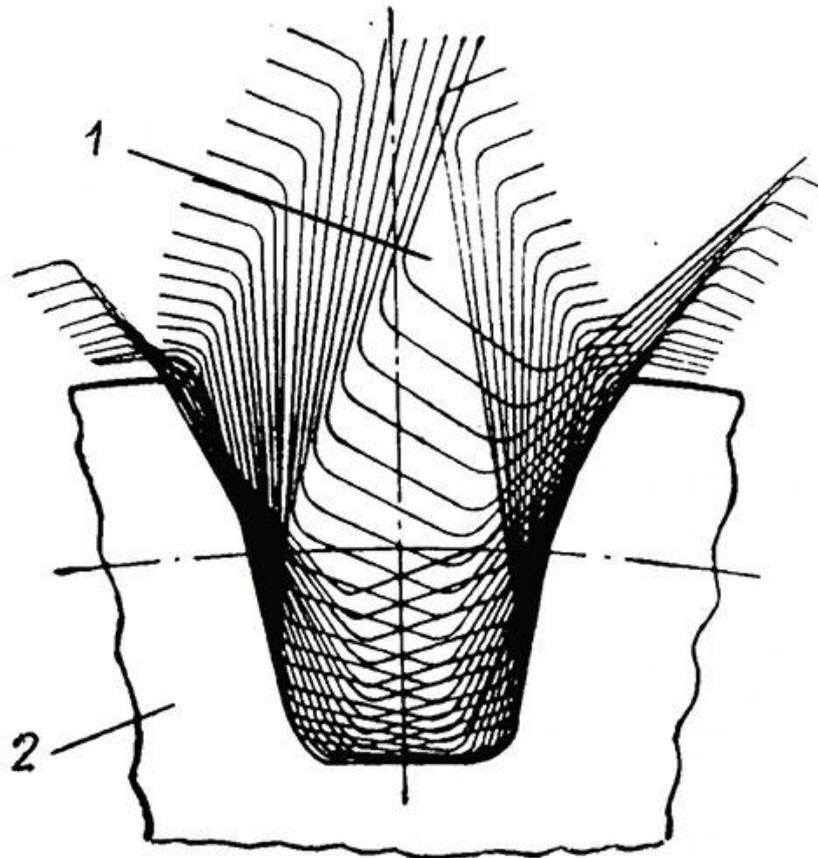


Figure 8 Tooth form generation

There are two ways of cutting the worm gears:

- 1) by hobbing cutter

2) by fly hob

In both cases, the tool reproduces the movements of the mated worm, as in an already running gear.

There are three methods of cutting by a hobbing cutter: with radial infeed, with tangential infeed, with radial-tangential infeed.

Cylindrical hobs are employed for radial infeed method. The hob enters the cut and can be displaced tangentially by a small distance in order to improve generating cutting on the flanks (Figure 10,a). This hobbing method has the shortest machining time and is generally employed for worm gear hobs with helix angles up to approximately 8° . The cutting edge length must be at least as long as the penetration length for the worm gear to be machined. Longer hobs can also be shifted. The advantage of this method is high productivity, it is used in batch and mass production. This method is used to cut gears of the 8th degree of accuracy. It is difficult to achieve the required accuracy according to the contact standards, if gear were cut by this method. These drives often binds, they need a long bedding.

Tangential infeed method is suitable for single-and multiple-start worm drives; However, the hobbing machine must be equipped with a tangential hobbing head. The hobs have a relatively long taper lead section which must remove the greater part of the metal (Figure 9). The cylindrical region contains one or two finishing teeth per hob start (Figure 10,b). The hob is set to the centre distance prior to the beginning of machining, and the penetration range between the hob and the worm gear must then be traversed tangentially. By selection of suitable feed values, the generating cuts which determine the tooth form can be modified as required. Owing to the long tangential runs, this method results in substantially longer hobbing times than the radial method. The simplest forms of the worm gear hob for tangential hobbing are the single- or multi-start fly-cut hobs. Fly-cut hobs are hobs with only one cutting tooth per start. They are relatively simple and low-cost tools, but they also have the lowest metal removal capacity. This method provides higher accuracy of the profile. Method of tangential infeed is preferable.

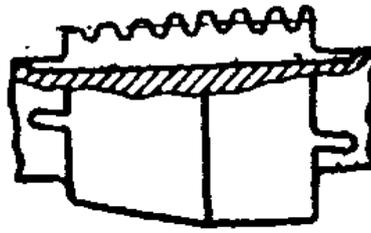


Figure 9. A hobbing cutter with starting taper

Radial-tangential infeed method is a mix of radial and tangential infeed methods. In this case, starting taper cut into workpiece with radial infeed. Then, when center-line distance is nominal, tangential infeed is started (Figure 10,c). Advantage of this method is high productivity - it is more productive than the radial feed method. In addition, this method helps to provide a more accurate tooth profile, in comparison with the tangential infeed method.

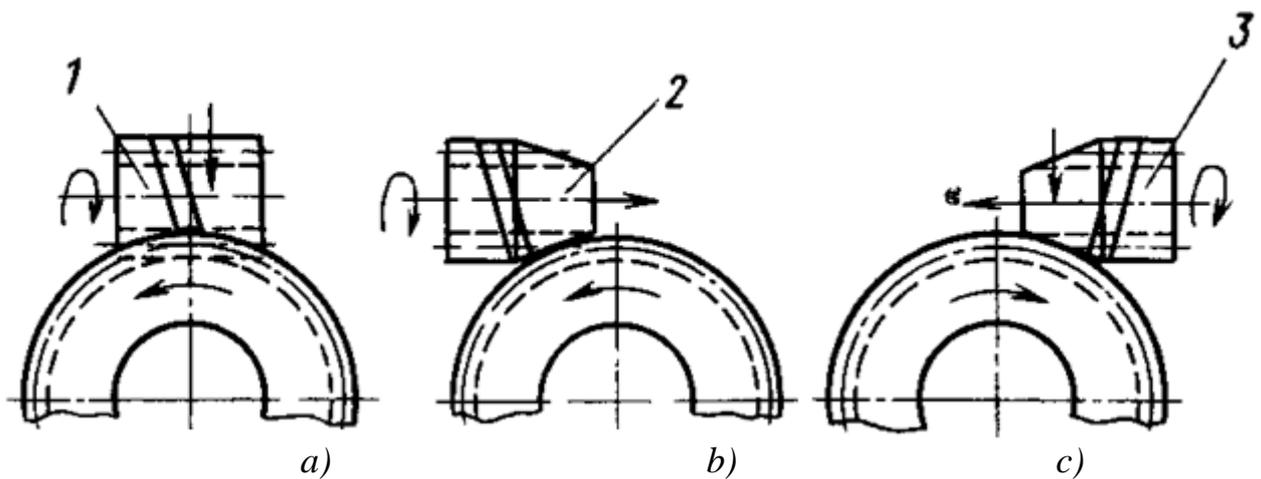


Figure 10. Worm gear cutting using a hobbing cutter

In single job manufacture using of hobbing cutters is disadvantageous. Usually worm gears are cut by fly hobs (Figure 11).

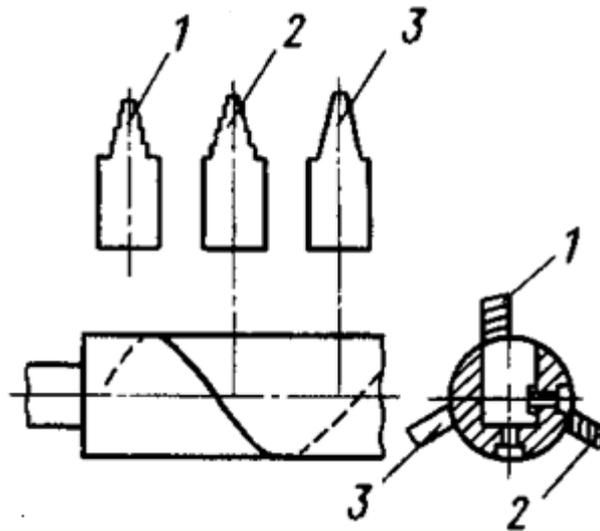


Figure 11. Cutting by fly hob

For high-precision worm wheels or coarse pitch gears several cutters are used. In this case cutters 1,2 (Figure 11) are used for roughing, cutter 3 – for finishing. The fly hob is used only for tangential infeed. Cutting operation is very continuous, with low tool life.

Method of cutting a worm gear is selected according to requirements for the quality of the worm drive. High accuracy drives or drives with high lead are made with hobbing cutters with starting taper or fly hobs, using tangential infeed.

CNC gear cutting

In CNC gear cutting, the worm gear cut in two stages: roughing and finishing. In the first stage an involute side milling cutter is used. This method was described above. Finally, the hobbing cutter is used. Five axis CNC machines help to improve the quality of worm gear manufacturing. Also, there is not resetups during CNC machining. The advantage of CNC machines is their high flexibility, which makes it possible to cut gears of different parameters and modules with minimal time spent on reconfiguring.

It is possible to cut the worm gear on CNC machines using a ball-nose end mill. To do this, you need to create a 3D-model of the gear. Then, for machining

according to this 3D-model, a CNC program is created. It is important to choose the right tool diameter based on the smallest radius of the fillet.

Conclusion

Basic involute gear geometry, worm gear geometry in particular, was considered. Worm drive is demand, but its manufacturing is too difficult and costly. It is necessary to design a hob cutter for every worm gear . It is very difficult to cut a worm gear in single job manufacturing.

Nowadays CNC milling machines are common. So worm gear may be cutted on this machine, if right 3D-model will design. The main difficulty in designing 3D-model of worm gear is its specific geometry.

Приложение Б
Расчёт эвольвентной кривой

Таблица 1 – Расчёт точек эвольвенты

$\alpha_i, \text{град}$	$\alpha_i, \text{рад}$	$inv, \text{рад}$	$inv, \text{град}$	$R, \text{мм}$
0	0	0	0	84,57234
1	0,017453	1,77241E-06	0,000101551	84,58522
2	0,034907	1,41844E-05	0,000812709	84,62389
3	0,05236	4,79017E-05	0,002744565	84,6884
4	0,069813	0,000113642	0,006511195	84,77886
5	0,087266	0,000222201	0,012731166	84,89539
6	0,10472	0,00038448	0,022029074	85,03819
7	0,122173	0,000611513	0,035037104	85,20746
8	0,139626	0,000914494	0,05239664	85,40348
9	0,15708	0,001304806	0,074759917	85,62654
10	0,174533	0,001794054	0,102791734	85,877
11	0,191986	0,002394089	0,137171234	86,15525
12	0,209439	0,003117048	0,178593762	86,46173
13	0,226893	0,003975384	0,227772809	86,79694
14	0,244346	0,004981902	0,285442068	87,1614
15	0,261799	0,006149798	0,352357591	87,55573
16	0,279253	0,007492697	0,429300082	87,98055
17	0,296706	0,009024699	0,517077332	88,4366
18	0,314159	0,010760419	0,616526816	88,92462
19	0,331612	0,012715041	0,728518466	89,44545
20	0,349066	0,014904367	0,85395765	90
21	0,366519	0,017344873	0,993788363	90,58923
22	0,383972	0,020053768	1,14899668	91,2142
23	0,401426	0,023049062	1,320614469	91,87603
24	0,418879	0,026349635	1,509723425	92,57595
25	0,436332	0,029975311	1,717459437	93,31525
26	0,453785	0,033946944	1,94501734	94,09534
27	0,471239	0,038286508	2,193656089	94,91775
28	0,488692	0,043017192	2,464704412	95,78409
29	0,506145	0,048163513	2,759566995	96,69612
30	0,523599	0,053751431	3,079731251	97,65572

α_b , град	α_b , рад	inv , рад	inv , град	R , мм
31	0,541052	0,059808481	3,426774769	98,6649
32	0,558505	0,066363913	3,802373503	99,72586
33	0,575958	0,073448853	4,208310802	100,8409
34	0,593412	0,081096475	4,646487391	102,0127
35	0,610865	0,089342193	5,118932417	103,2437
36	0,628318	0,098223879	5,627815709	104,5371
37	0,645772	0,107782096	6,175461402	105,896
38	0,663225	0,118060366	6,764363118	107,3238
39	0,680678	0,129105465	7,39720092	108,8242
40	0,698131	0,140967755	8,076860275	110,4013
41	0,715585	0,153701551	8,806453334	112,0594
42	0,733038	0,167365546	9,589342848	113,8033
43	0,750491	0,182023274	10,42916913	115,6381
44	0,767945	0,197743648	11,3298805	117,5694
45	0,785398	0,214601556	12,29576782	119,6033
46	0,802851	0,23267855	13,33150367	121,7466
47	0,820304	0,252063624	14,442187	124,0066
48	0,837758	0,272854104	15,63339419	126,3913
49	0,855211	0,295156669	16,91123748	128,9096
50	0,872664	0,319088523	18,28243222	131,5712

Приложение В
Расчёт эвольвентной кривой

Таблица 1 – Координаты точек эвольвенты

α , град	X	Y
0	84,57234	0
1	84,58522	0,00015
2	84,62389	0,0012
3	84,6884	0,004057
4	84,77886	0,009634
5	84,89539	0,018864
6	85,03818	0,032695
7	85,20745	0,052105
8	85,40344	0,078101
9	85,62647	0,111726
10	85,87687	0,154068
11	86,15501	0,206263
12	86,46131	0,269505
13	86,79625	0,34505
14	87,16032	0,434228
15	87,55407	0,538447
16	87,97809	0,659205
17	88,43299	0,798103
18	88,91947	0,956848
19	89,43822	1,137272
20	89,99	1,341343
21	90,57561	1,57118
22	91,19586	1,829066
23	91,85163	2,117469
24	92,54381	2,43906
25	93,27333	2,796735

α , град	X	Y
26	94,04113	3,193636
27	94,84819	3,633181
28	95,69548	4,119092
29	96,58399	4,655424
30	97,51468	5,246607
31	98,48849	5,897481
32	99,50634	6,613342
33	100,5691	7,399994
34	101,6774	8,263802
35	102,832	9,211757
36	104,0333	10,25154
37	105,2815	11,39161
38	106,5767	12,64128
39	107,9186	14,01081
40	109,3062	15,51153
41	110,7384	17,15597
42	112,2131	18,95795
43	113,7276	20,93278
44	115,2782	23,09738
45	116,8598	25,4705
46	118,4658	28,07291
47	120,088	30,92761
48	121,7156	34,06007
49	123,3351	37,49848
50	124,9297	41,27403