

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

На правах рукописи



НИКОЛЬСКИЙ Сергей Михайлович

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ПРЯМОЗУБЫХ КОЛЕС НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ КООРДИНАТНО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ**

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.

Организация производства

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Маликов Андрей Андреевич
доктор технических наук,
профессор

Тула – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
1 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС	12
1.1 Основные эксплуатационные параметры зубчатых колес	12
1.2 Технология нарезания зубчатых колес	14
1.3 Нормирование основных показателей качества зубчатых колес	20
1.4 Средства контроля показателей качества зубчатых колес	22
1.5 Анализ возможности использования универсальных КИМ для оценки показателей качества зубчатых колес	30
1.6 Выводы по главе 1	44
2 КООРДИНАТНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС	45
2.1 Возможность использования координатного метода при контроле геометрических параметров зубчатых колес	46
2.2 Определение координат точек контрольной сетки боковой поверхности зубчатого колеса по принятому объему измерений	66
2.3 Выводы по главе 2	75
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОСТАВЛЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС	76
3.1 Методика контроля расположения расчетных координат контрольных точек на боковой поверхности зубчатого колеса	76
3.2 Разработка методики проведения измерений	80
3.3 Методика обработки массива координат измеренных точек боковой поверхности зубчатого колеса, представленных ПО КИМ в форму, необходимую для представления в программу оценки результатов измерений ..	86
3.4 Выводы по главе 3	101
4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ	102
4.1 Формирование математической модели преобразования результатов контроля	102

4.2 Формирование алгоритма программы перевода результатов контроля в нормативные показатели	113
4.3 Оценка результатов координатного контроля с помощью программно-вычислительного комплекса контроля геометрических параметров зубчатых колес	116
4.4 Выводы по главе 4.....	127
5 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	129
5.1 Выводы по главе 5.....	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Среди широкой гаммы выпускаемой сложно-профильной продукции, особое место в производственном процессе занимают зубчатые колеса. Ввиду значительного числа их разновидностей, а также широкого диапазона применения в таких отраслях промышленности как машиностроение, судостроение, пищевая и горнодобывающая промышленность и др., к значениям показателей качества зубчатых колес и методам их оценки предъявляются высокие требования. Требования к проведению измерений зубчатых колес при оценке показателей их качества, изложенные в ГОСТ 1643-81 и ГОСТ ISO 1328-1-2017 и определяющие работоспособность колес, являются достаточно жесткими и предполагают использование специального и должным образом откалиброванного высокоточного и дорогостоящего оборудования на базе вычислительных комплексов.

При массовом, крупно- и среднесерийном производстве зубчатых колес использование такого оборудования экономически обосновано. Однако в условиях мелкосерийного и единичного производства, при осуществлении входного контроля комплектующих изделий или при производстве ремонтных работ такой контроль слишком затратен. Контроль с помощью ручных средств не обеспечивает необходимую для данного вида работ точность. В то же время на многих предприятиях в качестве приборов для контроля линейных размеров различных деталей используются универсальные координатно-измерительные машины (КИМ), которые обеспечивают высокую точность измерений, но не предназначены для оценки показателей качества зубчатых колес. Основной причиной отказа от использования универсальных КИМ для оценки показателей качества зубчатых колес является реализуемый на них метод координатного контроля, не применимый в настоящее время для оценки показателей качества зубчатых колес, указанных в нормативных документах. При этом значения показателей качества наиболее широко потребляемой в промышленности номенклатуры зубчатых колес сравнимы по точности с точностью измерений КИМ. Поэтому обоснование применения координатного контроля при оценке показателей качества зубчатых колес позволило бы получать

достаточно достоверные результаты при использовании имеющегося на предприятии оборудования.

Однако следует констатировать, что для практической реализации оценки показателей качества зубчатых колес методом координатных измерений на универсальных КИМ отсутствует необходимый инструментарий, который должен включать: способ определения числа и координат контрольных точек при контроле боковой поверхности зуба; способ определения минимально необходимого числа боковых поверхностей зубьев, требуемых для измерений и обеспечивающих оценку требуемых показателей качества зубчатого колеса; порядок формирования программы проведения замеров на КИМ и обработки результатов измерений.

Таким образом, актуальной является научная задача разработки методики оценки показателей качества зубчатых колес с использованием высоко-интегрированных систем контроля типа универсальных КИМ с целью расширения их эксплуатационных возможностей за счет введения в область их применения операций по оценке показателей качества зубчатых колес.

Степень разработанности темы. Проблеме оценки показателей качества зубчатых колес посвящено немало научных трудов. Основная их масса преимущественно затрагивает эффективность использования узкоспециализированного отечественного измерительного оборудования при оценке геометрических параметров колес различной степени точности. Так, исследованиям в области оценки параметров качества зубчатых колес с применением, специализированных КИМ посвящены работы многих отечественных авторов. Среди них разработкой оборудования и программного обеспечения для координатных измерений показателей качества зубчатых колес успешно занимается И.В. Сурков. В его работах рассматривается методическое и программное обеспечение для автоматизированных измерений геометрических параметров зубчатых колес и передач с использованием собственной научной разработки – четырехкоординатной измерительной системы. Большой вклад в теорию и практику применения координатных измерений внесли отечественные и зарубежные метрологи и приборостроители В.С. Лукьянов, Г.Я. Гафанович, А.И. Асташенков, А.Ю. Каспайратис, М.А. Палей, Н.Н. Марков, В.С.

Чихалов, В.А. Чудов, В.И. Телешевский, Л.З. Дич, Д.Т. Пуряев, И. И. Духопел, М.А. Кириллов, В.В. Леонов, В.Г. Лысенко, Т. Charlton, W. Lotze, D. Whitehouse, H. Neumann, H. Webber, E. Trapet, F. Hartig, C. Keck, K. Kniel, J.S. Chen, T.W. Kou, S.H. Chiou и др.

Однако несмотря на то, что исследования в области оценки показателей качества зубчатых колес проводились и проводятся в достаточно существенном объеме, современная действительность требует дальнейшего изучения обозначенной темы, так как в настоящее время отсутствуют методические основы проведения оценки показателей качества с применением универсальных неспециализированных КИМ, в том числе без использования дополнительного оборудования.

Целью исследования является повышение результативности процесса оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес в условиях мелкосерийного и ремонтного производства на основе расширения эксплуатационных возможностей универсальных координатно-измерительных машин.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи исследования**:

- 1) обосновать возможность использования координатного метода измерений при оценке показателей качества цилиндрических прямозубых колес;
- 2) разработать методику формирования и проведения оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес на универсальных координатно-измерительных машинах;
- 3) разработать методическое и программное обеспечение для обработки результатов оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес в соответствии с требованиями ГОСТ 1643-81 и ГОСТ ISO 1328-1-2017;
- 4) провести комплексную апробацию и внедрение предложенных научно-технических решений в производственных условиях.

Объект исследования – процесс оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес в условиях мелкосерийного и ремонтного производства.

Предмет исследования – повышение результативности процесса оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес в условиях мелкосерийного и ремонтного производства.

Соответствие паспорту специальности – содержание диссертации соответствует пункту 5 «Методы оценки качества объектов, стандартизации и процессов управления качеством» и пункту 9 «Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов» паспорта научной специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

Научная новизна результатов исследования заключается в разработке концепции повышения эффективности эксплуатации универсальных координатно-измерительных машин на основе расширения их эксплуатационных возможностей путем введения в область их применения операций по оценке показателей качества цилиндрических прямозубых немодифицированных зубчатых колес и обоснования возможной зоны и условий оценки показателей качества зубчатых колес, и включает необходимый инструментарий в виде:

- методики формирования и проведения процесса оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес на универсальных координатно-измерительных машинах, которая отличается от известных отсутствием необходимости использования специального измерительного оборудования;

- методического и программного обеспечения для обработки результатов оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес в соответствии с требованиями ГОСТ 1643-81 и ГОСТ ISO 1328-1-2017, отличающегося от известных возможностью обработки координатных параметров.

Теоретическое значение результатов работы заключается в том, что разработана концепция и инструментарий повышения эффективности эксплуатации универсальных координатно-измерительных машин на основе расширения их эксплуатационных возможностей, которые углубляют и конкретизируют область при-

менения управления качеством продукции, стандартизации, организации производства, как области науки и техники, в сфере решения задач производства прямозубых зубчатых передач.

Практическое значение результатов работы заключается в формировании методологического подхода к решению задачи оценки показателей качества цилиндрических прямозубых немодифицированных зубчатых колес с применением универсальных КИМ. Разработаны методические инструкции, позволяющие персоналу службы менеджмента качества предприятия освоить разработанную методику оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес на универсальных координатно-измерительных машинах.

Практическое использование разработанного методического и программного обеспечения для обработки результатов оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686365 от 07.11.2024) способствует сокращению временных затрат на оценку показателей качества зубчатых колес по сравнению с применением узкоспециализированных и ручных средств измерений, освобождает оператора КИМ от необходимости проведения измерений в ручном режиме, снижает риски возникновения погрешностей, связанных с влиянием человека, минимизирует элементы его субъективности, что положительно сказывается на общей результативности процесса оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес в условиях мелкосерийного и ремонтного производства.

Реализация работы. Результаты проведенных исследований в виде методических инструкций использованы при оценке качества партий зубчатых колес на предприятиях ООО «Станкотехника», г. Тула, АО «КБП им. академика А. Г. Шипунова», г. Тула, ООО «Сфера» г. Тула и приняты к внедрению на АО «АК «Тулалашмашзавод», г. Тула и АО «Тулаторчмаш», г. Тула.

Методология и методы диссертационного исследования. При выполнении работы использовались научные положения всеобщего управления качеством, метрологии, математической статистики, современное оборудование и методы алгоритмизации и программирования. Задачи по определению необходимого объема

измерений выполнялись в соответствии с экспериментальными методами исследований. Все эксперименты проводились с использованием высокотехнологичного оборудования компании Coord3 (Италия), работающего на базе комплектующих компании Renishaw (Великобритания).

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес на универсальных координатно-измерительных машинах с использованием координатного метода.
2. Методическое и программное обеспечение для обработки результатов оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес в соответствии с требованиями ГОСТ 1643-81 и ГОСТ ISO 1328-1-2017.
3. Результаты комплексной апробации предложенных научно-технических решений.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов обусловлена использованием фундаментальных теоретических положений, адекватностью разработанных математических моделей, методик и программ, проведенных экспериментальных исследований, использованием современного научного оборудования, а также практической реализацией на профильных предприятиях.

Апробация результатов. По теме диссертации автором опубликованы 11 научных работ, в том числе 7 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Инструментальные и метрологические системы» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (2022, 2023, 2024, 2025 гг.); III и IV Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (г. Тула, 2022, 2023 гг.); 59-й и 60-й научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием (г. Тула, 2023, 2024 гг.);

Всероссийской научно-технической конференции «От качества инструментов к инструментам качества» (г. Тула, 2023 г.); II Всероссийской научно-практической конференции «Всероссийский форум молодых исследователей – 2024» (г. Петрозаводск, 2024 г.); XXI Международной научно-практической конференции «Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения – 2024» (г. Ижевск, 2024 г.).

Личный вклад соискателя заключается в разработке концепции повышения эффективности эксплуатации универсальных координатно-измерительных машин на основе расширения их эксплуатационных возможностей; в обосновании возможной зоны и условий оценки показателей качества зубчатых колес, в разработке методики оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес на универсальных координатно-измерительных машинах с использованием координатного метода; в разработке методического и программного обеспечения для обработки результатов оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес в соответствии с требованиями ГОСТ 1643-81 и ГОСТ ISO 1328-1-2017; в апробации результатов исследования; в подготовке публикаций по выполненной диссертационной работе.

Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве: [10] – определение размера сетки контрольных точек; [11] – оценка воспроизводимости результатов измерений; [53] – расчет эффективности процесса оценки показателей качества зубчатых колес; [56] – разработка структуры процесса оценки показателей; [60] – разработка основных зависимостей для расчета параметров норм плавности и кинематической точности зубчатого колеса; [62] – определение фонда времени; [73] – обзор преимуществ и недостатков современного программного обеспечения КИМ; [92] – разработка программы проведения оценки показателей качества зубчатых колес на КИМ; [93] – расчет числа резов и величины шага между резами; [97] – разработка методики процесса оценки показателей качества колес на универсальной КИМ; [99] – разработка порядка проведения этапов процесса оценки показателей качества прямозубых зубчатых колес.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации без приложений составляет 147 страниц, включая 90 рисунков, 22 таблицы, список литературы из 108 наименований. Приложения к диссертации изложены на 9 страницах.

1 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

1.1 Основные эксплуатационные параметры зубчатых колес

Зубчатое колесо – одна из самых главных деталей в любой зубчатой передаче, представленная в виде диска с расположенными на нем зубьями на цилиндрической или конической поверхности, входящими в зацепление с зубьями другого зубчатого колеса [15, 16].

Наиболее распространенными и востребованными во многих отраслях промышленности являются цилиндрические прямозубые колеса с внешними зубьями (рисунок 1.1).

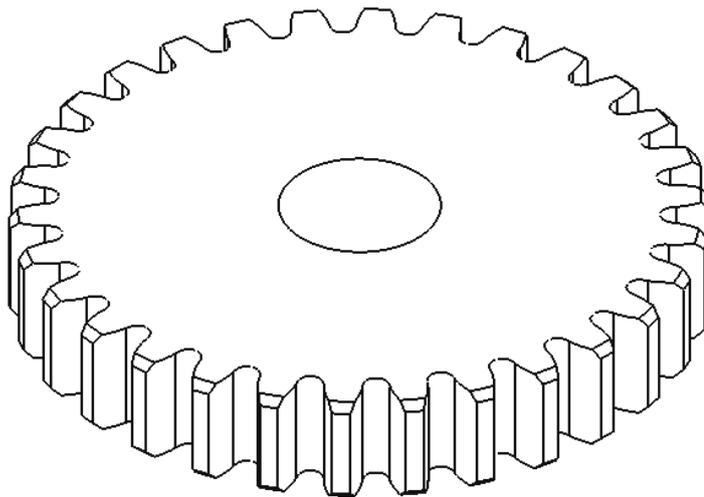


Рисунок 1.1 – Цилиндрическое прямозубое зубчатое колесо

Использование зубчатых колес по видам передач можно оценить следующим образом: цилиндрические зубчатые колеса с внешними зубьями – 85-90 % от общего количества, из них около 97 % – прямозубые; цилиндрические колеса с внутренними зубьями, в основном прямозубые – 3-4 %; конические прямозубые – 6-7 %; конические с круговыми зубьями – около 1 % [82, 84].

Массовое распространение данные детали получили ввиду большого числа их достоинств и преимуществ, среди которых:

- способность передачи значительных мощностей при достаточно небольших габаритах;
- высокая прочность и жесткость зубьев;
- равномерность вращения колес в передаче;
- надежность и простота эксплуатации.

Указанные выше достоинства обеспечиваются конструкцией зубчатых колес (рисунок 1.2).

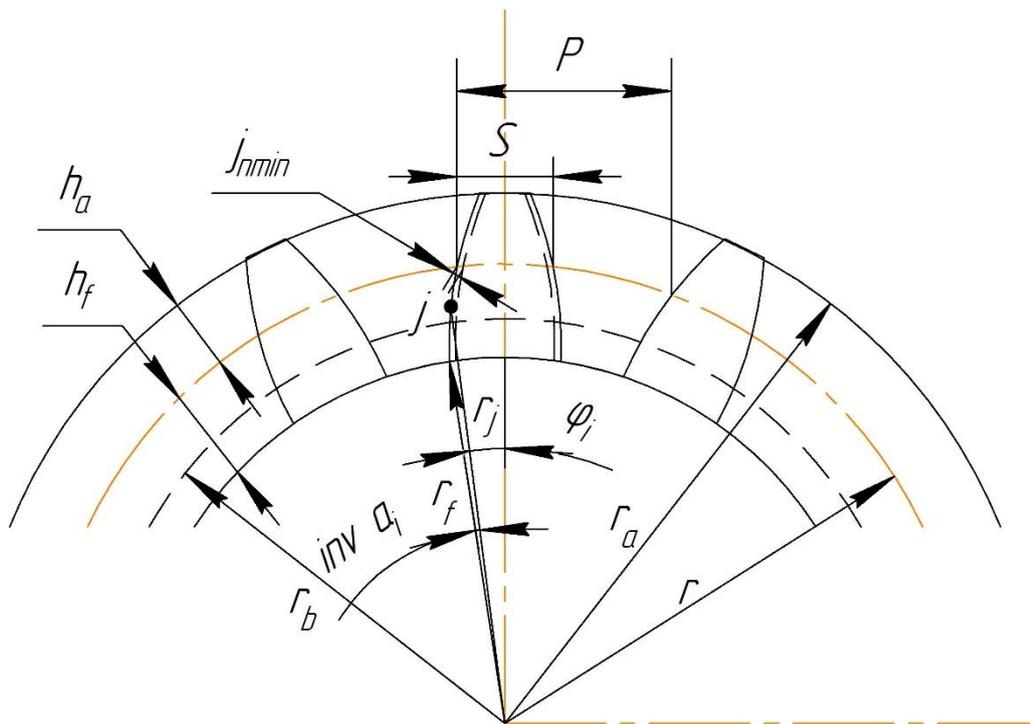


Рисунок 1.2 – Схема расположения зубьев колеса

r – радиус делительной окружности, r_a – радиус вершин зубьев, r_b – радиус основной окружности, r_f – радиус окружности впадин, φ_i – координатный угол точки на профиле зуба, r_j – радиус точки на профиле зуба, $inv \alpha_i$ – инволюта угла, S – толщина зуба, P – шаг зубьев, j_{nmin} – норма бокового зазора, h_f – высота ножки зуба, h_a – высота головки зуба

Образующая боковой поверхности зубьев, обеспечивающая равномерное вращение должна соответствовать геометрической линии, называемой эвольвентой [17]. Ее математическое описание представлено ниже

$$\cos \alpha_i = \frac{r_b}{r_j}; r = m_n Z \quad (1.1)$$

$$inva_i = tga_i - a_i \quad (1.2)$$

$$\varphi_i = \left(\frac{S}{2r} \pm inva_n \mp inva_i \right) \quad (1.3)$$

$$\begin{cases} x_i = r_i \cos \varphi_i \\ y_i = r_i \sin \varphi_i \end{cases} \quad (1.4)$$

где m_n – модуль зубчатого колеса,

Z – число зубьев зубчатого колеса,

x_i и y_i – координаты точек эвольвентного профиля колеса.

Боковой зазор – j_{nmin} , выраженный в утонении зуба, обеспечивает отсутствие заклинивания передачи при эксплуатации (деформация, нагрев и т. п.).

Несоответствие любого из приведенных параметров снижает качество эксплуатации колес. Ориентируясь на указанные параметры, можно выделить основные из них, нарушение которых влияет на работоспособность колес (рисунки 1.3, 1.4):

1. Несоосность зубчатого венца и базового посадочного отверстия (радиальное биение f_r).
2. Отклонение направления зуба от заданного (F_β).
3. Отклонение формы эвольвенты при ее построении от r_b , несоответствующем заданному (Δr_b).
4. Отклонение образующей боковой поверхности от эвольвенты (f_f).
5. Нарушение шага зубьев (f_p).
6. Несоблюдение величины бокового зазора (f_n).
7. Погрешности, связанные с кинематикой обработки (Δl).

Данные отклонения являются следствием технологических погрешностей изготовления колес.

1.2 Технология нарезания зубчатых колес

В настоящее время различают два метода нарезания эвольвентных зубчатых колес – копирования и обкатки (огибания).

Метод копирования как малопроизводительный и неточный метод нарезания зубчатых колес применяется в единичном или ремонтном производстве для неотвественных изделий [85].

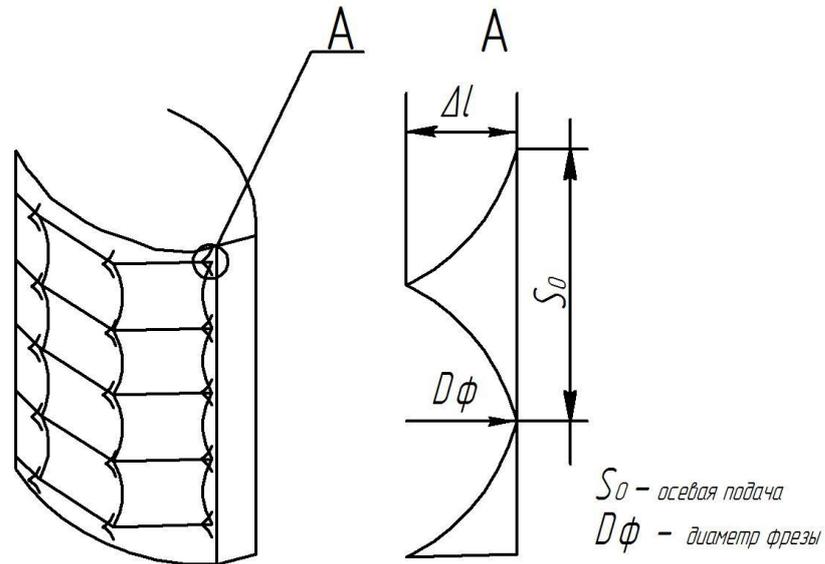


Рисунок 1.3 – Погрешность боковой поверхности колеса, связанная с кинематикой обработки

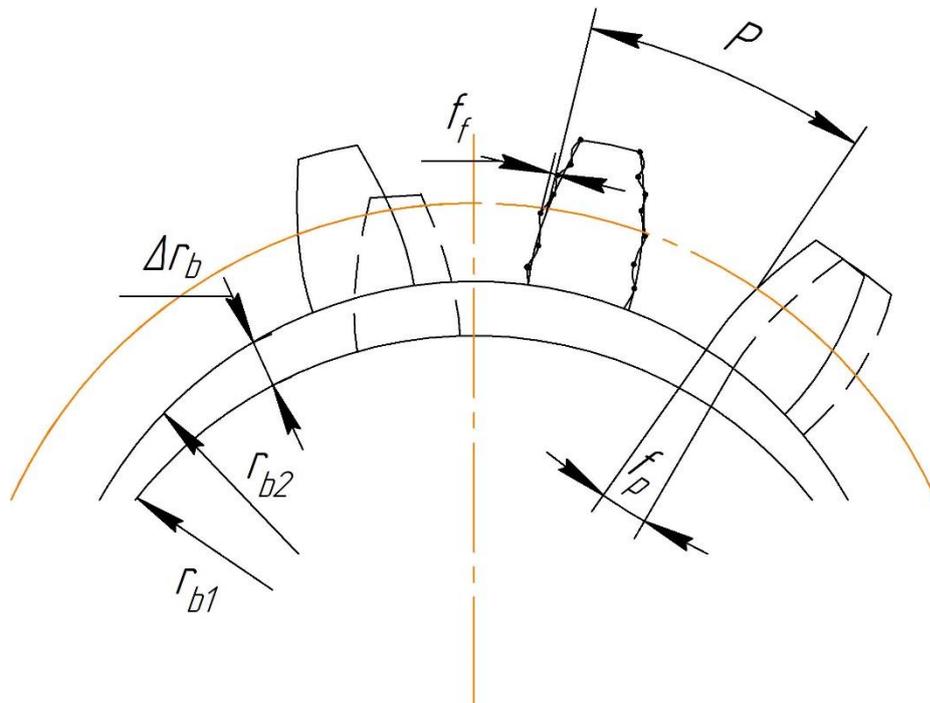


Рисунок 1.4 – Нарушение формы эвольвенты и отклонение образующей боковой поверхности от эвольвенты

Метод обкатки, наиболее высокопроизводительный и более точный, широко применяется в серийном и массовом производстве [49, 67].

Принцип реализации данного метода заключается в том, что при нарезании зубчатого колеса заготовке и инструменту сообщаются движения, воспроизводящие работу соответствующего зубчатого зацепления: пары зубчатых колес, зубчатого колеса с рейкой, червяка с червячным зубчатым колесом [31]. Причем взаимные движения заготовки и инструмента должны осуществляться в соответствии с передаточным отношением зубчатой передачи. Метод обкатки обеспечивает непрерывное формообразование зубьев колеса. Нарезание зубчатых колес этим методом получило преимущественное распространение вследствие высокой производительности и значительной точности обработки [38, 39, 40]. Инструменты, работающие по методу обкатки, более универсальны, так как могут нарезать одним инструментом данного модуля колеса того же модуля с любым числом зубьев. К ним (инструментам) относятся зуборезные гребенки, червячные зуборезные фрезы и зуборезные долбяки (рисунок 1.5).

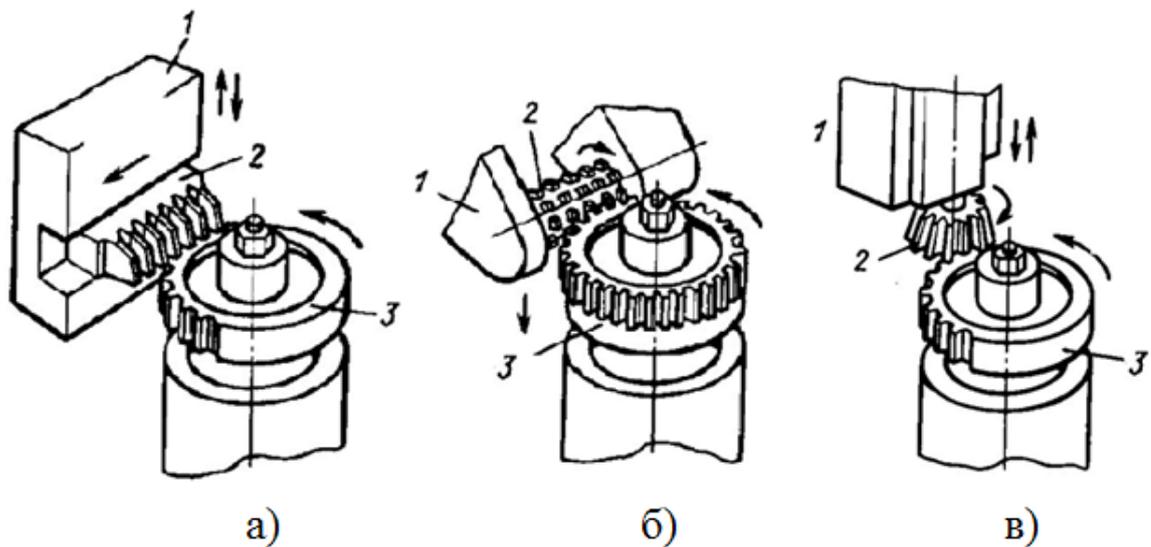


Рисунок 1.5 – Схемы нарезания зубчатых колес методом обкатки

а – зуборезная гребенка; б – червячная модульная фреза;

в – зуборезный долбяк; 1 – штоссель; 2 – фреза; 3 – заготовка

Метод формирования зубьев зуборезной гребенкой. Прямозубые гребенки (рисунок 1.6) предназначены для обработки на зубострогальных станках цилиндрических зубчатых колес внешнего зацепления с углами профиля исходного контура 20° .

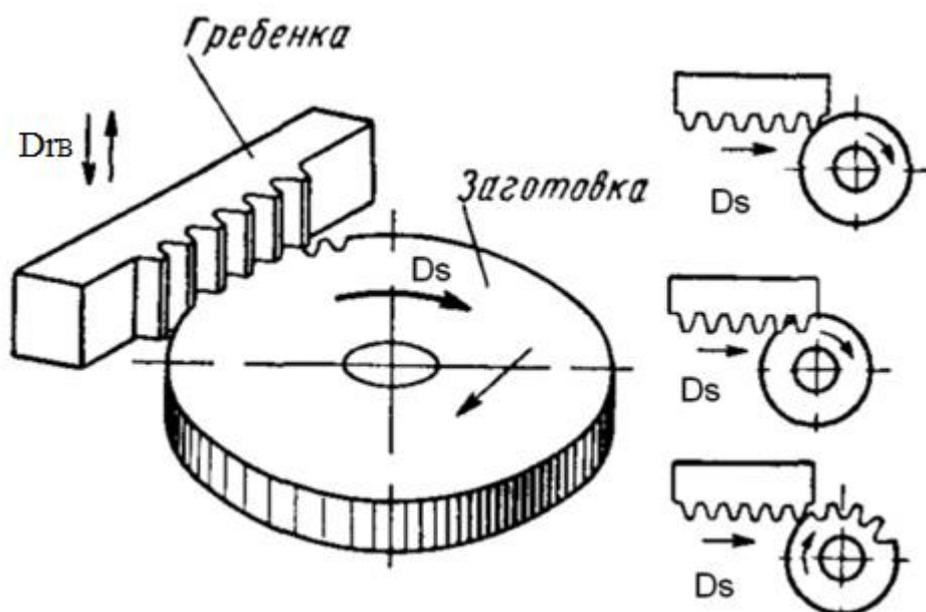


Рисунок 1.6 – Схема нарезания зубчатого колеса зуборезной гребенкой

D_{rB} – движение резания, D_s – движение обката

Гребенка получает возвратно-поступательное движение (главное движение), которая при рабочем ходе снимает стружку, а при вспомогательном ходе для уменьшения трения она отводится от заготовки. Движение обката (движение подачи) складывается из медленного вращения заготовки и связанного с ним поступательного перемещения гребенки вдоль начальной прямой. При этом движения гребенки и заготовки строго согласованы [8, 9].

Гребенка является более точным инструментом, чем червячная фреза, в соответствии с нормативными документами изготавливаются трех классов точности: АА – для колес 6-й степени точности, А – для колес 7-й степени точности, В – для колес 8-й степени точности по ГОСТ 1643-81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски» [20].

Основными погрешностями данного вида обработки являются:

1. Погрешности настройки оборудования – f_r , Δr_b , f_n , f_p .

2. Погрешности, связанные с режущим инструментом – $\Delta r_b, f_f, f_P$.

Метод формирования зубьев зуборезным долбяком. Зуборезной долбяк представляет собой зубчатое режущее колесо, преобразованное в режущий инструмент, с модулем, равным модулю нарезаемого колеса и каждый зуб которого имеет передний и задний углы [26]. При резании долбяк совершает движения вдоль своей оси, поэтому каждый зуб играет роль резца (рисунок 1.7).

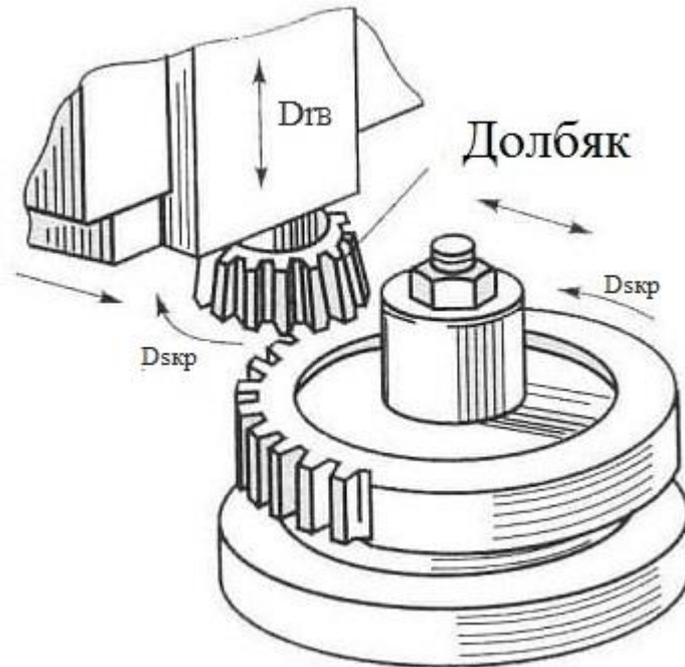


Рисунок 1.7 – Схема нарезания зубчатого колеса зуборезным долбяком

D_{rB} – движение резания, $D_{скр}$ – движение обката

В зависимости от класса точности, для разных степеней используются соответствующие долбяки:

1. Класс АА предназначен для обработки колес 6-й степени точности.
2. Класс А используется для работы с колесами 7-й степени точности.
3. Класс Б применяется для обработки колес 8-й степени точности.

Основными погрешностями данного вида обработки являются:

1. Погрешности настройки оборудования – $f_r, \Delta r_b, f_n, f_P$.
2. Погрешности, связанные с режущим инструментом – $\Delta r_b, f_f, f_P$.

Метод формирования зубьев червячной зуборезной фрезой. Данный метод основан на использовании принципа работы зубчатого зацепления.

Червячная фреза для обработки зубчатых колес представляет собой червяк с профилем резьбы в виде зуборезной рейки, превращенной в режущий инструмент путем прорезания стружечных канавок и затылования зубьев (рисунок 1.8). В соответствии с ГОСТ 93240-80 «Фрезы червячные чистовые однозаходные для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем» фрезы изготавливаются следующих классов точности: AAA, AA, A, B, C и D, которые применяются для нарезания цилиндрических и червячных зубчатых колес соответственно 5-6-й, 7-10-й и 11-й степеней точности [23, 27, 28].

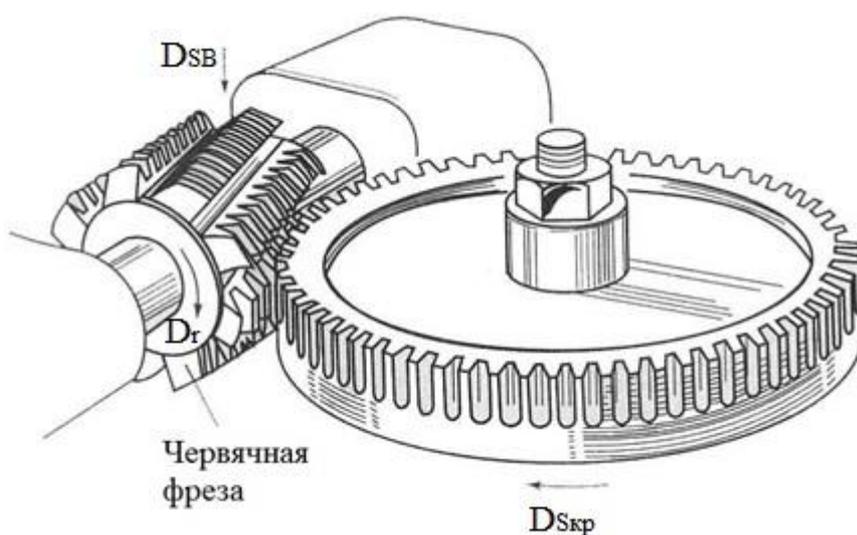


Рисунок 1.8 – Схема нарезания зубчатого колеса червячной зуборезной фрезой

D_{SV} – осевая подача, $D_{СКР}$ – движение обката, D_r – движение резания

Для червячных фрез кроме погрешностей, формируемых при зубодолблении дополнительно добавляется погрешность кинематики обработки – Δl (рябь [85]).

Метод шлифования зубьев. Для изготовления зубчатых колес 4-6-й степени точности применяют операцию шлифования на специальном оборудовании. Сложность данной операции привела к необходимости создание специальных производств, число которых достаточно ограничено.

Работоспособность зубчатых колес непосредственно связана с указанными выше погрешностями изготовления, поэтому при проектировании передач необходимо нормировать их значения.

1.3 Нормирование основных показателей качества зубчатых колес

В связи с высоким уровнем влияния качества зубчатых колес на их эксплуатационные показатели, были разработаны и введены в действие следующие нормативные документы: ГОСТ 1643-81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски» и ГОСТ ISO 1328-1-2017 «Передачи зубчатые цилиндрические. Система ISO. Классификация допусков на боковые поверхности зубьев. Часть 1. Определения и допускаемые значения отклонений на боковые поверхности зубьев зубчатого колеса».

В соответствии с требованиями данных стандартов, в таблице 1.1 приведен перечень параметров зубчатых колес, подлежащих контролю [3, 25].

Таблица 1.1 – Перечень контролируемых параметров зубчатых колес

№ п/п	Измеряемый параметр ГОСТ 1643-81	Обозначение	Степень точности
1	Кинематическая погрешность	F'_{ir}	3-8
2	Накопленная погрешность шага колеса	F_{Pr}	3-8
3	Накопленная погрешность k шагов	F_{PKr}	3-8
4	Допуск на погрешность обката	F_{Cr}	3-8
5	Радиальное биение зубчатого венца	F_{rr}	3-12
6	Колебание длины общей нормали	F_{uWr}	3-8
7	Колебание измерительного межосевого расстояния за оборот колеса	F''_{ir}	5-12
8	Местная кинематическая погрешность колеса	f'_{ir}	3-8
9	Погрешность профиля зуба	f_{fr}	3-8
10	Отклонение шага зацепления	f_{Pbr}	3-12
11	Отклонение шага	f_{Ptr}	3-12
12	Колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе	f''_{ir}	5-12

№ п/п	Измеряемый параметр	Обозначение	Степень точности
13	Погрешность направления зуба	$F_{\beta r}$	3-12
14	Допуск на суммарную погрешность контактной линии	F_{Kr}	3-12
15	Суммарное пятно контакта	–	3-11
16	Наименьшее дополнительное смещение исходного контура	E_{Hs}	–
17	Допуск на смещение исходного контура	T_H	–
18	Предел. отклонение межосевого расстояния	f_a	–
ГОСТ ISO 1328-1-2017			
1	Общая накопленная погрешность шага	F_P	7-11
2	Погрешность шага	f_P	7-11
3	Толщина зуба	s	7-11
4	Общая погрешность профиля	F_a	7-11
5	Общая погрешность направления зуба	F_B	7-11

Каждую из представленных в ГОСТ 1643-81 норм, будь то норма кинематической точности, плавности работы или контакта зубьев, характеризует несколько измеряемых параметров, контроль которых обеспечивается на большом числе разнообразных средств измерений [88, 89].

Однако, в большинстве случаев при выполнении измерений руководствуются так называемыми комплексами равноправных контролируемых показателей, направленных на выявление совокупности погрешностей при непрерывном процессе контроля. В свою очередь к таким комплексам показателей относятся: комплексы кинематической точности – F_{Pr} и F_{PKr} ; F_{Cr} и F_{rr} ; F_{uWr} и F_{rr} ; F_{uWr} и F'_{ir} ; F_{Cr} и F'_{ir} , комплексы плавности работы – f_{Pbr} и f_{fr} ; f_{Pbr} и f_{Ptr} , комплексы контакта зубьев – пятно контакта; $F_{\beta r}$ и F_{Kr} , комплексы бокового зазора E_{Hs} и T_H ; E_{Wms} и T_{Wm} ; E_{Cs} и T_C [71].

Исходя из сказанного, можно сделать вывод, что для контроля зубчатых колес возможно использовать следующий перечень параметров качества:

1. Радиальное биение зубчатого венца (F_{rr}).
2. Колебание длины общей нормали (F_{uWr}).
3. Отклонение шага зацепления (f_{Pbr}).

4. Погрешность профиля зуба (F_{fr}).
5. Погрешность направления зуба (F_{Br}).
6. Фактическое наименьшее дополнительное смещение исходного контура (E_{Hr}).

Для установления фактических значений вышеперечисленных параметров рекомендованы приведенные ниже методы и инструменты.

1.4 Средства контроля показателей качества зубчатых колес

В настоящее время существует и эффективно функционирует достаточное количество предприятий, специализирующихся на производстве зубчатых колес, для которых их изготовление является основным и единственным направлением производства. Однако большое количество предприятий имеет достаточно ограниченные объемы их производства. Кроме этого, при использовании зубчатых колес в качестве комплектующих так же необходима их оценка при входном контроле [29].

Как показал анализ, на большинстве не специализированных предприятий машиностроения изготавливаются и применяются прямозубые, цилиндрические зубчатые колеса внешнего зацепления с эвольвентным профилем зубьев. Параметры данных колес находятся в следующих пределах:

- нормальный модуль $m_n = 1.25 \dots 6$ мм;
- число зубьев $Z_K = 20 \dots 100$;
- угол исходного контура $\alpha = 20^\circ$;
- высота зуба $h = 0 \dots 60$ мм.

Скорость вращения колес в большинстве механизмов не превышает 3000 об/мин [5, 80], поэтому точность наиболее широко используемых промышленности колесе лежит в пределах 7-12-й и только некоторых показателей по 6-й степени точности. Все это требует наличия различных методов и средств контроля и оценки различных параметров их качества [104]. Каждую из представленных в ГОСТ 1643-81 норм характеризует несколько измеряемых параметров, контроль которых в

свою очередь обеспечивается соответствующим числом средств измерений. В настоящее время для контроля показателей качества зубчатых колес используются узкоспециализированные зубоизмерительные машины (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Зубоизмерительная машина фирмы «Wenzel»

Данные средства измерений обладают достаточными показателями метрологических характеристик для контроля широкого перечня геометрических параметров зубчатых колес различной степени точности. Однако, их применение на предприятиях, осуществляющих ограниченный выпуск зубчатых колес или при проведении входного контроля данной продукции экономически нецелесообразно, ввиду высокой стоимости такого оборудования.

Выпускаемые измерительные комплексы, работающие в комплекте с универсальными КИМ, являются высоко интегрированными, дорогостоящими и требуют

значительного времени на установку и настройку, а также на удаление с КИМ, что снижает эффективность ее использования (рисунок 1.10).

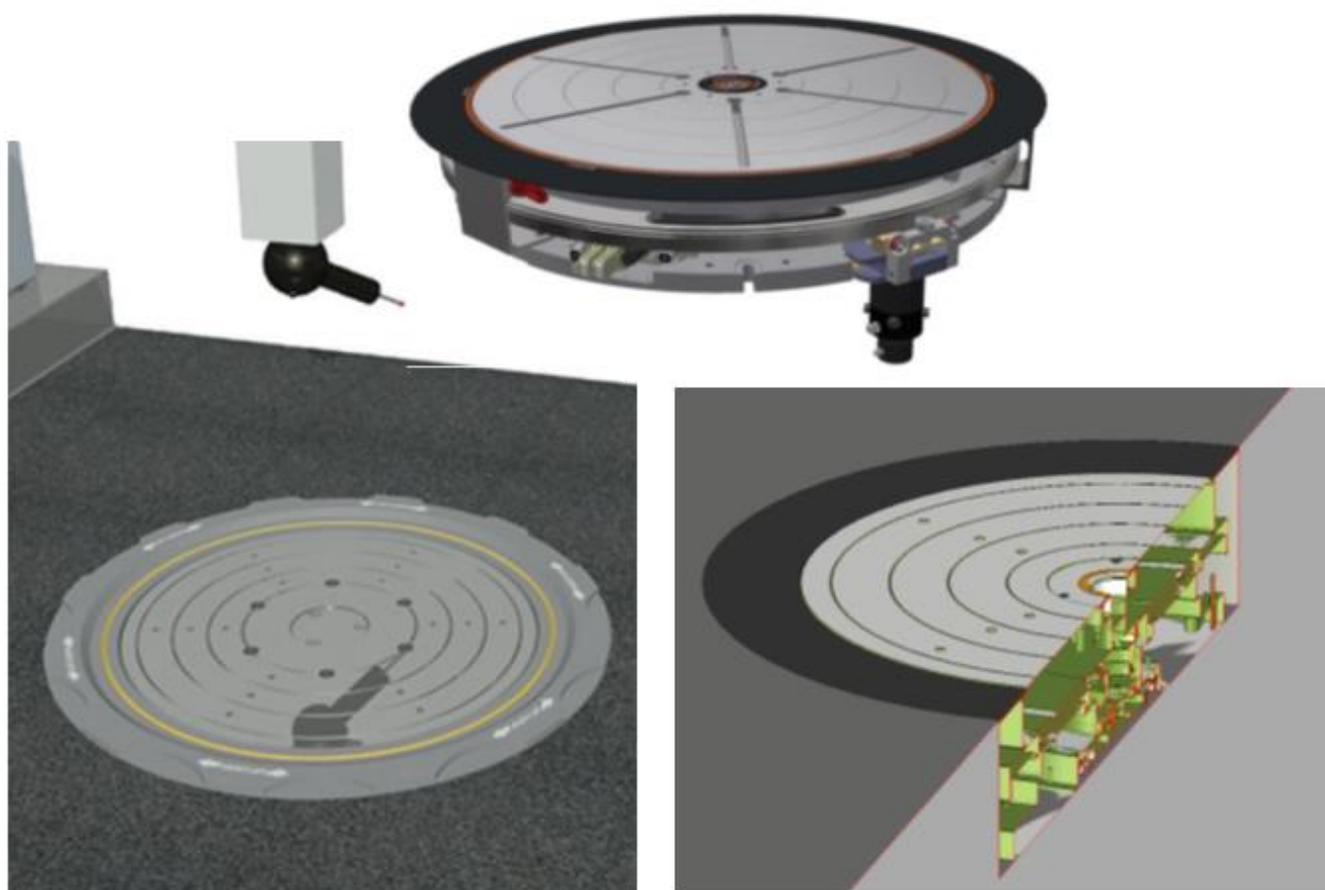


Рисунок 1.10 – Интегрированный поворотный стол для КИМ

Кроме зубоизмерительных машин, для контроля зубчатых колес в серийном и мелкосерийном производствах используется ручной по степени автоматизации инструмент [2]. Однако, за долгие годы эксплуатации эти приборы морально устарели и потеряли свои метрологические характеристики. Кроме того, использование большого числа средств измерений является достаточно неудобным процессом ввиду необходимости частой переналадки оборудования [54, 61].

Так, контроль радиального биения зубчатого колеса выполняется с помощью биениемера (рисунок 1.11).

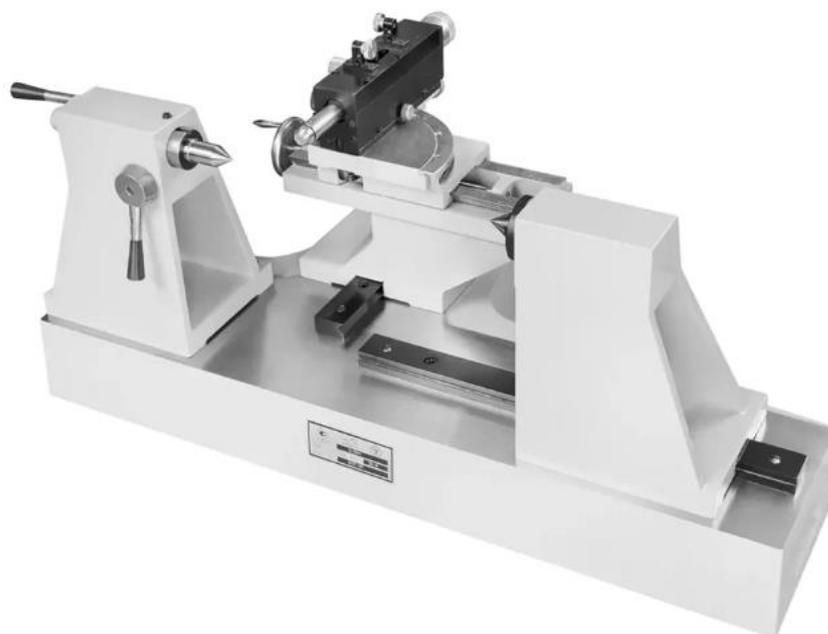


Рисунок 1.11 – Биенимер Б-10М

Измерение данного параметра осуществляется путем помещения детали на коническую оправку в центрах прибора. Далее на основе данных колеса, в частности его модуля, выбирается необходимый диаметр измерительного наконечника, в свою очередь закрепляемого на измерительном стержне прибора. Измерительный наконечник поочередно помещается во все впадины колеса, а значения на индикаторе записываются в протокол измерений. Контроль заканчивается на впадине, с которой был начат процесс измерения. Разность между наибольшим и наименьшим показаниями индикатора соответствует величине радиального биения зубчатого колеса.

Для контроля длины общей нормали используются приборы, своей конструкцией предусматривающие наличие двух параллельных плоскостей, соприкасающихся с профилями зубьев колеса. Например, это могут быть как микрометры (рисунок 1.12), так и более специализированные приборы – нормалемеры (рисунок 1.13).



Рисунок 1.12 – Микрометр зубомерный «Mitutoyo»



Рисунок 1.13 – Нормалемер БВ-5045

Контроль выполняется следующим образом. Губки прибора устанавливаются так, чтобы между ними помещалось, требуемое число зубьев (группа). Измерение выбранной группы выполняется несколько раз в целях необходимости убедиться в стабильности показаний прибора. Контроль длины общей нормали выполняется по всем зубьям колеса с фиксацией полученных значений на приборе с учетом знака. Из полученных данных выбирают максимальное и минимальное значение, их разность и есть наибольшее колебания длины общей нормали.

Контроль параметров норм плавности работы, в частности шага зацепления выполняется при помощи инструментального микроскопа (рисунок 1.14) или с помощью специального шагомера (рисунок 1.15).



Рисунок 1.14 – Инструментальный измерительный микроскоп УИМ-21

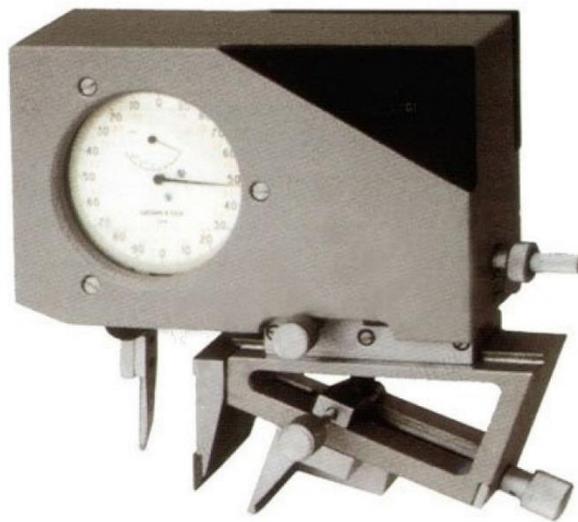


Рисунок 1.15 – Шагомер БВ-5070

Измеряемое колесо помещается в рабочее пространство микроскопа (измерительный столик) таким образом, чтобы вертикальная штриховая линия проходила касательно к эвольвенте зуба, происходит фиксация значения. Путем продольного перемещения штриховой линии к следующему зубу колеса выполняется фиксация

значения по микровинту продольного перемещения. Разность двух отсчетов и будет действительной величиной шага зацепления. Далее выполняется измерение следующих пар зубьев по аналогичной схеме.

Подвижный измерительный наконечник шагомера устанавливается в соответствии с модулем аттестованного зубчатого колеса. Установочный наконечник устанавливают так, чтобы он касался одноименных боковых сторон зубьев в зоне делительной окружности колеса. Контролируемую деталь поворачивают и переставляют шагомер последовательно с одной пары зубьев на другую, фиксируя показания отсчетного устройства шагомера.

Погрешность эвольвентного профиля зуба оценивается с помощью специальных приборов – эвольвентомеров (рисунок 1.16). Фиксация погрешности профиля выполняется через каждые 5° угла развернутости, который в свою очередь отсчитывается по шкале прибора. Для визуального представления получаемых результатов измерений производится построение действительного профиля зуба, в дальнейшем он сравнивается с теоретическим. Разность между максимальным и минимальным отклонениями действительного профиля от теоретической эвольвенты есть величина полной действительной погрешности профиля.

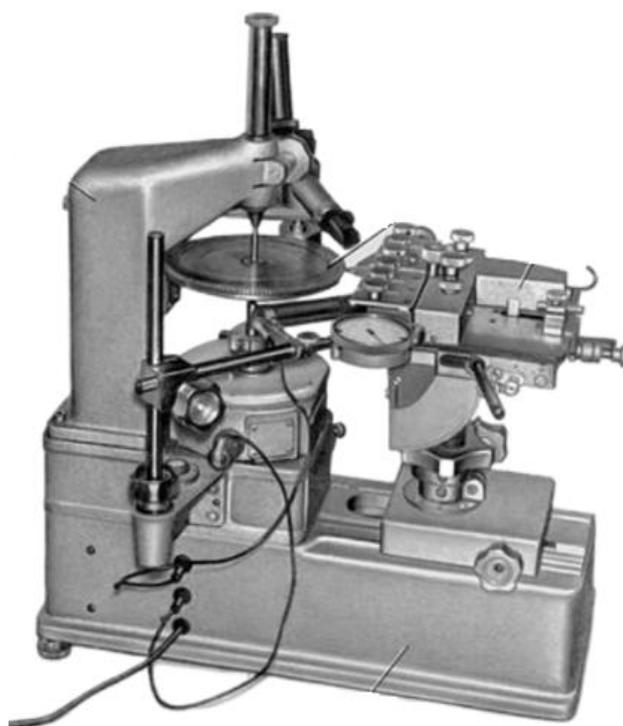


Рисунок 1.16 – Эвольвентомер

Для определения величины смещения исходного контура зубчатого колеса используется штангензубомер (рисунок 1.17).



Рисунок 1.17 – Штангензубомер ШЗН-16

Данный прибор накладывают на зуб колеса, предварительно выполнив настройку по ролику, и покачивая колесо определяют максимальное отклонение стрелки индикатора. Полученный результат является величиной дополнительного смещения исходного контура от его номинального положения.

Контроль отклонений измерительного межосевого расстояния выполняется с применением межцентромера (рисунок 1.18).

В рабочую область прибора помещается измерительное и измеряемое колесо, происходит их зацепление. Поворачивая измеряемое зубчатое колесо на один зуб, фиксируют показания индикаторной головки.

Основной точности указанных приборов, является используемое нормализованное средство измерений, в качестве которого в большинстве случаев выступают индикаторы часового типа с ценой деления – 5 мкм. Поэтому погрешность измерений всегда выше данной величины.



Рисунок 1.18 – Межцентромер НИИК-1020

Проведенный анализ показывает, что требования к широкой номенклатуре применяемого в работе зубоизмерительного оборудования так или иначе вызывают определенные сложности в процессе проведения контроля зубчатых колес. Среди основных проблемных мест можно выделить необходимость частой настройки и переналадки оборудования в зависимости от типа зубчатого колеса, его метрологических характеристик, сложность замены узкоспециализированных приборов на аналоги ввиду их неритмичного выпуска, умение обращаться с большим числом измерительного инструмента, знание методик выполнения измерений, элементы субъективности контролера при выполнении измерений и оценке их результатов [81].

1.5 Анализ возможности использования универсальных КИМ для оценки показателей качества зубчатых колес

Как отмечалось ранее, одним из наиболее сложных вопросов в машиностроении является контроль сложно-профильных поверхностей, ввиду своих конструктивных особенностей. В частности, контроль зубчатых колес не является исключением. Учитывая постоянно растущие требования к качеству

проводимых измерений [42], ручные по степени автоматизации средства измерений, описанные выше постепенно уходят на второй план, а их место занимают более прецизионные КИМ [1, 14, 95].

На сегодняшний день КИМ – это одно из наиболее эффективных средств измерений, предназначенных для определения разнообразных геометрических характеристик изделий, в том числе отклонения формы и расположения поверхностей деталей различных типов и сложности. В настоящий момент производится широкая гамма КИМ, поэтому всегда можно приобрести подходящую модель, которая будет соответствовать тем или иным требованиям [57, 58].

Среди множества видов данных средств измерений, наибольшее распространение получили КИМ портального типа. КИМ такой конструкции состоят из массивной, прямоугольной, гранитной плиты, на которую установлен подвижной портал с пинолью, несущей зондирующую систему. Перемещение портала и пиноли осуществляется на воздушных подшипниках по гранитным направляющим. Основными преимуществами данных устройств являются: малые и средние размеры, что позволяет устанавливать данное оборудование в небольших помещениях, простота установки детали, минимальная геометрическая деформация и высокая жесткость конструкции [51].

Высокая точность измерения портальных КИМ обеспечивается:

1. Прецизионными направляющими, выполненными из сплава алюминия.
2. Конструкцией портала, выполненного в виде жесткой замкнутой рамы.
3. Предметным столом, исключая деформации основания и направляющих портала.
4. Прецизионными фотоэлектрическими системами измерения перемещений узлов КИМ по всем координатам.
5. Жесткими прецизионными опорами с малым воздушным зазором и минимальным расходом воздуха.

Измерения на КИМ могут проводиться в двух режимах: ручном и автоматическом [30, 87, 99]. Автоматический режим – режим измерения, при котором все

действия, необходимые для измерения детали, осуществляются по заданной программе и управление перемещением датчика касания также выполняется с помощью ЭВМ без участия оператора [43, 55]. При любом режиме измерения должна быть предварительно разработана методика проведения измерений или, как часто говорят, составлена программа измерения конкретной детали. При ручном режиме измерения эта программа составляется и практически одновременно реализуется оператором. Программа для измерения включает в себя решение о последовательности измерения отдельных точек, отдельных элементов детали (стратегия измерений), о числе точек, которые должны быть измерены, а также параметры геометрической точности, которые необходимо рассчитать, данные, выводимые на протокол в результате измерения, и т. д. Программы не связаны с конкретными размерами измеряемой поверхности, а только зависят от параметров, которые необходимо выяснить, например, диаметр окружности или отклонения расположения [92, 94].

Принимая во внимание тот факт, что все эксперименты и исследования в данной работе были проведены с использованием КИМ итальянской фирмы производителя «COORD 3» модели «ARES 10.7.5», все дальнейшие упоминания о данном типе средств измерений будут ссылаться на КИМ, представленную ниже.

КИМ «ARES» 10.7.5 (рисунки 1.19, 1.20) представляет собой машину портального типа, предназначенную для измерений деталей малых и средних габаритов, что говорит об их небольших диапазонах измерений. Особенность данной серии заключается в сохранении максимальной точности на всем диапазоне измерений за счет быстрой термодиффузии направляющих, выполненных из алюминиевого сплава.

Принцип действия КИМ основан на последовательном нахождении координат ряда точек поверхности в пространстве и последующем расчете на их основе размеров и параметров формы изделия [74]. Особенностью координатных измерений является определение координат отдельных точек поверхностей элементов детали и расчет по полученным результатам нормируемых геометрических параметров, а не непосредственное получение размеров в процессе измерений.



Рисунок 1.19 – Внешний вид КИМ «ARES 10.7.5»

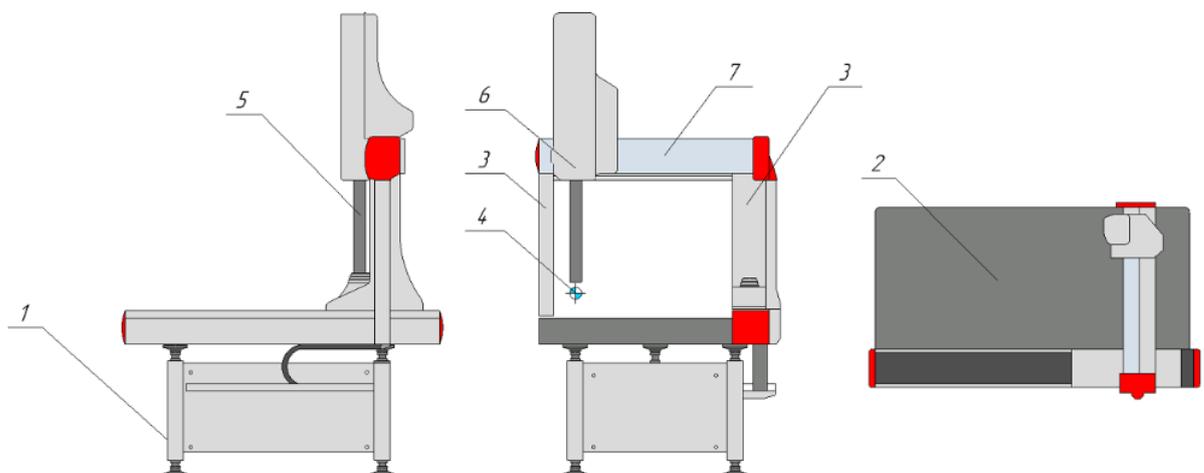


Рисунок 1.20 – Основные части КИМ «ARES 10.7.5»

1 – металлическое основание, 2 – измерительный стол из гранита, 3 – привод перемещения вдоль оси X , 4 – измерительная головка, 5 – пиноль, 6 – привод перемещения вдоль оси Y , 7 – горизонтальная балка, 8 – боковая направляющая, идущая вдоль оси Z

Для определения координат точек поверхности используется зондирующая система, которая включает в себя датчик касания со сферическим наконечником на конце. По стандартам координатной метрологии существует специальный термин для таких датчиков касания – щуп (рисунок 1.21).



Рисунок 1.21 – Внешний вид датчика касания (щупа) КИМ

Основное назначение таких датчиков состоит в том, чтобы в момент соприкосновения измерительного наконечника с поверхностью измеряемой детали снять отчет с измерительных средств (оптических энкодеров), соответствующих интервалам перемещения щупа по осям X , Y , Z и затем передать данные в компьютер для анализа с помощью вычислительного блока [36, 107].

При работе датчик контакта чаще всего устанавливается на пиноли, перемещающейся в вертикальном направлении на моторизированной измерительной головке. Головка RH10M Plus (рисунок 1.22) предназначена для установки измерительных датчиков и удлинителей посредством резьбового соединения M8.

Датчики и удлинители вкручиваются в резьбовую втулку и затягиваются с помощью специального гаечного ключа. Моторизированная измерительная головка RH10M Plus имеет два угла поворота: A – от 0° до 105° с шагом $7,5^\circ$ (15 угловых положений) и B – от 0° до $\pm 180^\circ$ с шагом $7,5^\circ$ (48 угловых положений). Это позволяет создать в сумме 720 различных положений.

В состав измерительной системы так же входят следующие компоненты:

1. Установочный модуль датчика TP20.
2. Измерительно-контактный модуль системы TP20.
3. Модульный магазин MCR-20 для автоматической смены модулей.

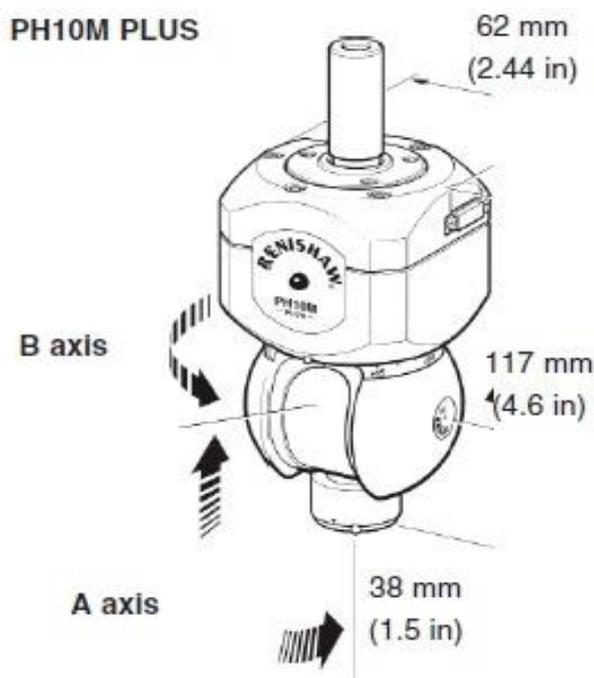


Рисунок 1.22 – Измерительная головка PH10M Plus

Устройство TP20 представляет собой 5 или 6 осевой контактный механический триггерный датчик (датчик касания) со сменными модулями, позволяющий использовать различные щупы и удлинители для доступа к элементам деталей сложной формы.

Двухблочная конструкция включает в себя установочный модуль (корпус датчика) и сменный измерительно-контактный модуль (модуль щупа), которые соединяются между собой посредством магнитного соединения с точным базированием, обеспечивающим высокую повторяемость при установке. Такое решение дает возможность выполнять смену контактных модулей, как в автоматическом, так и в ручном режиме без повторной калибровки наконечников щупов, что существенно сокращает время выполнения измерений. Обеспечивая целый диапазон усилий срабатывания, эти модули позволяют оптимальным образом выбирать характеристики датчика для выполнения конкретной задачи. Имеется семь различных контактно-измерительных модулей, каждый из которых предназначен для решения конкретного круга задач.

Магазин MCR20 (рисунок 1.23) предназначен для надежного размещения

контактных модулей, используемых при быстрой автоматической смене инструмента. Находящиеся в магазине модули защищены при этом от загрязнений, которые могут присутствовать в рабочей среде КИМ.



Рисунок 1.23 – Магазин MCR-20

КИМ измеряют одновременно в трех декартовых координатах. Традиционная конструкция представляет собой три взаимно ортогональные направляющие (рисунок 1.24), X, Y, Z, и обеспечивает перемещение по трем осям измерительной головки.

Основные метрологические характеристики КИМ модели «ARES 10.7.5» представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Метрологические характеристики КИМ

Модель	Максимально допустимая погрешность по ISO 10360-2 / ISO 10360-4, мкм				Макс. Скорость позиционирования, мм/с	Макс. Ускорение по осям, мм/с
	T ₁ : 18-22°C		T ₂ : 16-26°C			
10.7.5	MPE _E	MPE _P	MPE _E	MPE _P	500	1500
	2,5+L/300	2,5	2,5+L/200	2,5		

Примечания

1. MPE_E – допускаемая абсолютная объемная погрешность.
2. MPE_P – допускаемая абсолютная погрешность измерительной головки.
3. L – измеряемый размер в миллиметрах.

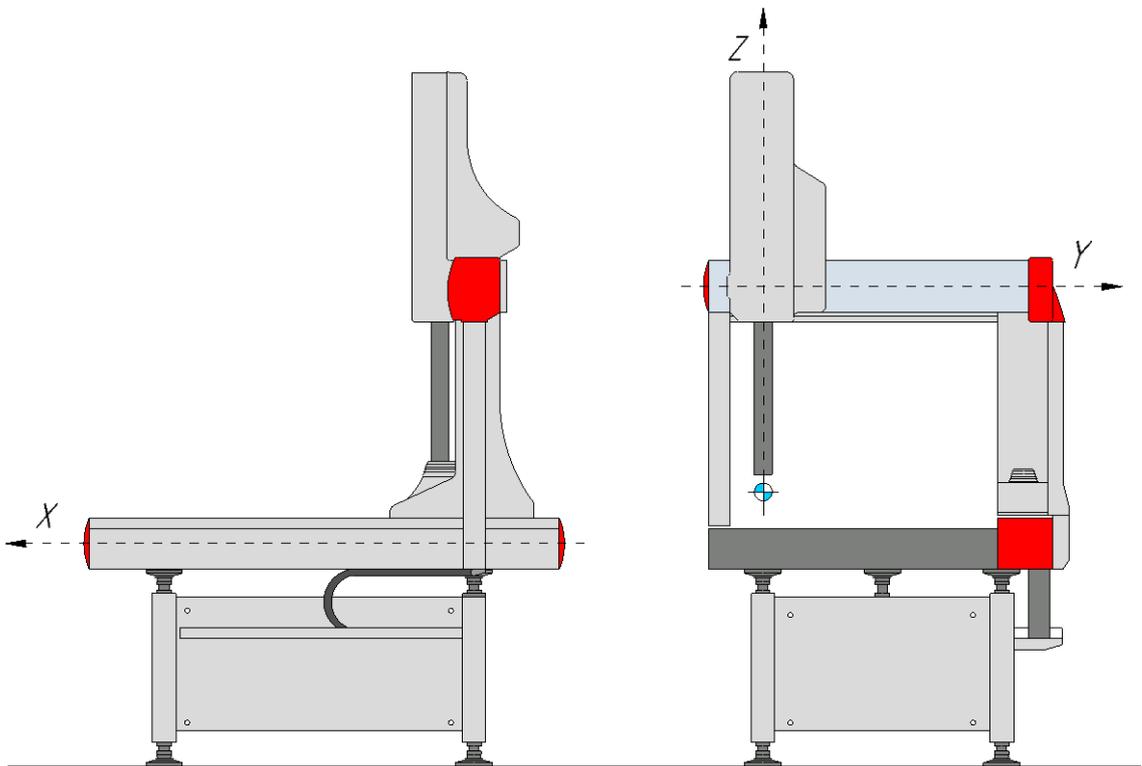


Рисунок 1.24 – Система координат КИМ

Основные технические характеристики КИМ модели «ARES 10.7.5» указаны в таблице 1.3 и для более наглядного представления обозначены на рисунке 1.25.

Грамотная эксплуатация таких высокоточных средств измерений, как КИМ позволяет избежать порчи, поломок, а также значительного увеличения инструментальной погрешности устройств. Условия эксплуатации КИМ модели «ARES 10.7.5» представлены в таблице 1.4.

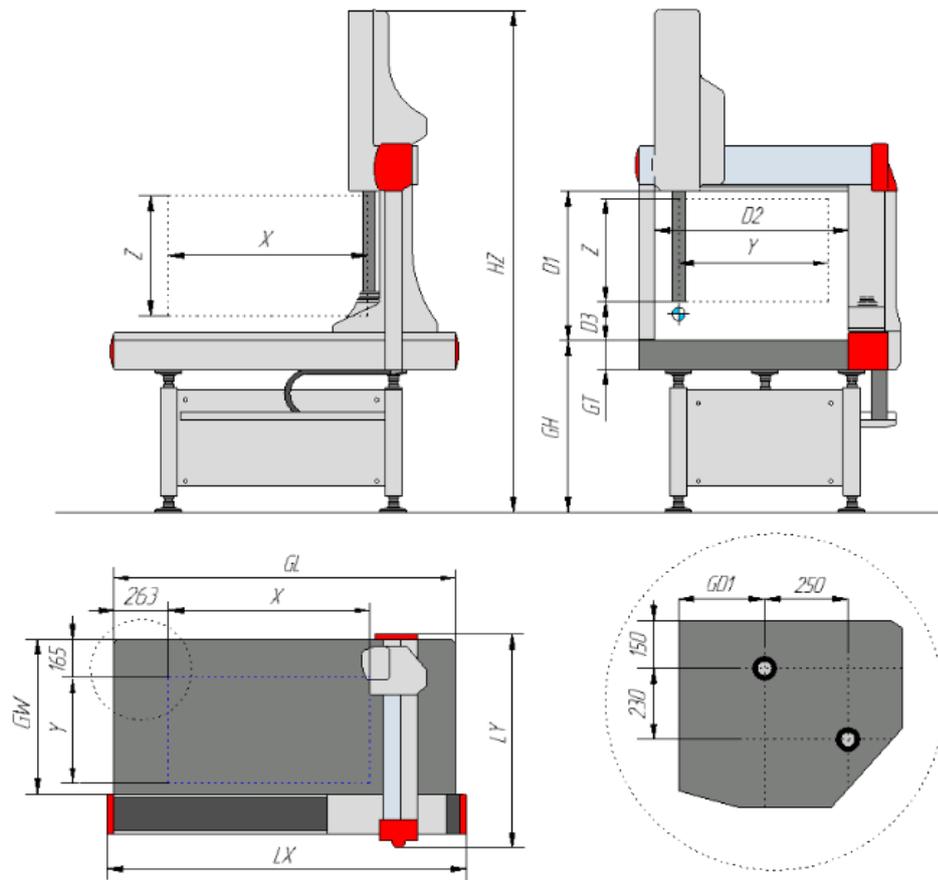


Рисунок 1.25 – Основные технические характеристики КИМ «ARES 10.7.5»

Таблица 1.3 – Технические характеристики КИМ

Модель	Диапазон измерений			Общие габариты			Базовая плита					Опоры			Масса			
							Высота	Толщина	Длина	Ширина	Отверстия				Макс. Масса детали	Масса машины		
10.7.5	X	Y	Z	LX	LY	HZ	GH	GT	GL	GW	GD1	D1	D2	D3	700	925		
	(мм)			(мм)			(мм)					(мм)					(кг)	
	1000	650	500	1680	1160	2429	750	170	1630	899	350	688	819	172,5				

Таблица 1.4 – Условия эксплуатации КИМ

Диапазон температуры окружающего воздуха, °С	Диапазон относительной влажности воздуха,	Диапазон атмосферного давления, мм рт.ст.	Давление воздуха в пневматической системе, Мпа, не менее
от +18 до +22	от 40 до 80 (без конденсации)	от 630 до 795	0,6

Примечание – Максимальные изменения температуры окружающего воздуха должны составлять: 0,5°С в течение 1 часа, 2°С в течение 24 часов, 0,5°С на расстоянии 1 м.

Контроль геометрических параметров зубчатых колес с применением КИМ является достаточно сложным и трудоемким процессом, ввиду конструктивных особенностей данного изделия, а также некоторых особенностей КИМ, которые следует принимать во внимание при выполнении измерений [65].

У большинства КИМ в метрологических характеристиках указано нормированное значение погрешности измерений в пределах 2 до 3 мкм [37, 48], к которому добавляется расчетное значение $\delta_{и}$, связанное с величиной измеряемого размера l :

$$\Delta_{и} = \frac{l}{300} \text{ мкм} \quad (1.5)$$

Принимая во внимание требования ГОСТ 5368-81 «Приборы для измерения цилиндрических зубчатых колес. Типы и основные параметры. Нормы точности» заявленные метрологические характеристики СИ для контроля зубчатых колес, в том числе КИМ должны отвечать требованиям настоящего стандарта. В таблице 1.5 приведены требования к метрологическим характеристикам СИ, предназначенных для контроля параметров зубчатых колес, согласно п. 1.3. Для каждого параметра приведены минимально допустимые пределы погрешностей СИ.

Таблица 1.5 – Пределы допустимых погрешностей СИ в зависимости от контролируемого параметра зубчатого колеса

Измеряемый параметр	Предел допускаемой погрешности СИ, мкм
Радиальное биение зубчатого венца (F_{rr})	6-8
Колебание длины общей нормали (F_{uWr})	6
Погрешность шага зацепления (F_{pbr})	4-6
Погрешность профиля зуба (F_{fr})	3,5-5
Погрешность направления зуба ($F_{\beta r}$)	4-10
Фактическое наименьшее дополнительное смещение исходного контура (E_{Hr})	10

В соответствии с ГОСТ 1643-81, для параметров норм кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев в зависимости от модуля и диаметра устанавливаются допуски, чьи пределы варьируются от 1 до 1000 мкм. Значения

допусков для группы зубчатых колес 7(6) – 12 степени точности, как наиболее часто используемых в промышленности указаны в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Допуски контролируемых параметров зубчатых колес

Степень точности зубчатого колеса	Модуль, мм	Делительный диаметр, мм	Контролируе- мый параметр	Значение допуска на контролируемый параметр, мкм
6	1-3.5	≤ 600	F_{rr}	25-45
	1-16		F_{uWr}	16-45
	1-3.5		F_{Pbr}	9,5-12
	1-3.5		F_{fr}	8-12
	1-16		F_{Br}	9-16
	1-3.5		F_{rr}	36-63
7	1-25	≤ 600	F_{uWr}	22-60
	1-3.5		F_{Pbr}	13-17
	1-3.5		F_{fr}	11-17
	1-25		F_{Br}	11-20
...
12	1-3.5	≤ 600	F_{rr}	160-200
	–		F_{uWr}	–
	1-3.5		F_{Pbr}	75-95
	–		F_{fr}	–
	1-55		F_{Br}	112-200

При выборе СИ для проведения измерений необходимо руководствоваться следующим положением – выбор СИ по точности должен осуществляться с соблюдением правила:

$$\Delta \leq 1/3 \cdot T \quad (1.6)$$

где Δ – погрешность СИ,

T – допуск на измеряемый параметр [22, 52, 75].

Учитывая требования ГОСТ 5368-81, а также задавшись заявленными метрологическими характеристиками КИМ, значениями допусков на контролируемые параметры и вышеупомянутым соотношением погрешности измерительного прибора и допуска на параметр, необходимо сделать своего рода выборку зубчатых

колес, поскольку не все колеса начиная с 6 степени точности подлежат контролю на КИМ с установленным значением погрешности более 3 мкм.

Принимая во внимание требования по соотношению точности СИ и допуска на контролируемый параметр зубчатого колеса, получаем следующее – при погрешности КИМ в 3 мкм, минимально допустимое значение допуска должно начинаться от 9 мкм. В том случае, если допуски контролируемых параметров сравнимы с показателями точности КИМ, рекомендуется повысить точность измерений за счет проведения многократных измерений, что легко осуществимо на КИМ за счет формирования измерительной программы и повторных прохождений точек контроля боковых поверхностей зубчатого колеса. Проведение многократных измерений способствует уменьшению величины среднеквадратических отклонений результатов измерений и как следствие минимизации влияния случайных погрешностей на конечный результат измерений путем увеличения количества измерений [59].

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.7)$$

где n – количество измерений;

σ_0 – среднеарифметическое значение среднеквадратического отклонения σ .

Однако, с увеличением количества измерений, возрастает время контроля зубчатого колеса, что приводит к повышению стоимости измерений [77]. Поэтому для рассматриваемого вида контроля не рекомендуется более 5 повторений измерений [70].

Согласно [12, 53, 62, 64], рассматривающих экономическую эффективность эксплуатации средств измерений, были приведены расчеты по определению стоимости одной минуты работы КИМ. В качестве примера была выбрана КИМ в среднем ценовом сегменте со всем сопутствующим дополнительным оборудованием и определена стоимость ее эксплуатации сроком порядка 10 лет, т. к. зачастую производителем указывается именно такой период эксплуатации данного СИ. Учитывая средний срок службы СИ и дополнительного оборудования, равный 10 годам, была получена средняя стоимость одной минуты работы за весь срок эксплуатации

– 18,5 руб. Кроме того, опытным путем было установлено, что проведение однократного измерения зубчатого колеса как минимум по трем зубьям занимает в среднем 3 минуты машинного времени. Данное обстоятельство необходимо учитывать при контроле большой партии зубчатых колес, с широким перечнем контролируемых параметров.

Проведенный анализ точностных характеристик КИМ позволяет говорить о том, что для контроля зубчатых колес в пределах 7(6) -12 степени точности, с делительным диаметром до 600 мм возможно использование универсальных КИМ малых и средних размеров с точностью измерений от 3 до 4 мкм в зависимости от допусков контролируемых параметров.

Как было сказано ранее, принцип координатных измерений основан на зондировании исследуемой поверхности, результатом которого является формирование массива координат измеренных точек. Такие данные сами по себе являются неинформативными, т. к. по ним невозможно провести оценку необходимых параметров качества контролируемой детали, в частности зубчатого колеса. Для этого, полученные результаты измерений должны пройти специальную обработку в соответствии с определенной методикой. Однако, в настоящее время для контроля показателей качества зубчатых колес методом координатных измерений на универсальных КИМ отсутствует необходимый для этого инструментарий, который должен включать программное обеспечение (ПО) с положенными в основу методики проведения следующих видов работ: определение числа и координат контрольных точек при контроле боковой поверхности зуба, определение минимально необходимого числа боковых поверхностей зубьев, требуемых для измерений и обеспечивающих контроль требуемых показателей качества зубчатого колеса, порядок формирования программы проведения замеров на КИМ, обработка результатов измерений.

1.6 Выводы по главе 1

1. Определено, что наиболее используемыми в промышленности являются цилиндрические зубчатые колеса внешнего зацепления, которые составляют около 85-90 % от общего количества по видам передач, из них 97 % – прямозубые.

2. Установлено, что в промышленности в основном используются зубчатые колеса с делительным диаметром до 600 мм и модулем $m \geq 1.25$ мм с параметрами качества в пределах 7(6) -12 степени точности.

3. Проведенный анализ подтверждает возможность использования универсальных КИМ с погрешностью от 3 до 4 мкм для контроля указанного диапазона параметров цилиндрических прямозубых зубчатых колес.

4. При необходимости, для повышения точности измерений возможно проведение многократных измерений в объеме – не более 5 повторений.

5. На основании вышеизложенного подтверждена актуальность и определена цель работы: повышение результативности процесса оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес в условиях мелкосерийного и ремонтного производства на основе расширения эксплуатационных возможностей универсальных координатно-измерительных машин.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1) обосновать возможность использования координатного метода измерений при оценке показателей качества цилиндрических прямозубых колес;

2) разработать методику оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес на универсальных координатно-измерительных машинах с созданием трехмерной модели контролируемого объекта по исходным данным;

3) разработать методическое и программное обеспечение для обработки результатов оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес в соответствии с требованиями ГОСТ 1643-81 и ГОСТ ISO 1328-1-2017;

4) провести комплексную апробацию и внедрение предложенных научно-технических решений в производственных условиях.

2 КООРДИНАТНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

При контроле параметров зубчатых колес следует учитывать, что представляемыми результатами контроля являются комплексные показатели, относящиеся ко всей поверхности зуба или центра его расположения. Ввиду регулярности контролируемых поверхностей оценка данных параметров может проводиться по «частным» замерам. Согласно требованиям ГОСТ ISO 1328-1–2017, рекомендуемое количество измеряемых точек составляет порядка 150 на длину траектории обката (рисунок 2.1, а). Для повышения достоверности контроля возможно увеличение контролируемых сечений до 6 (рисунок 2.1, б) [105]. Применяя такую стратегию измерений, большие участки зуба остаются неохваченными, при этом объем измерений очень значителен и требует специальной системы обработки [9].

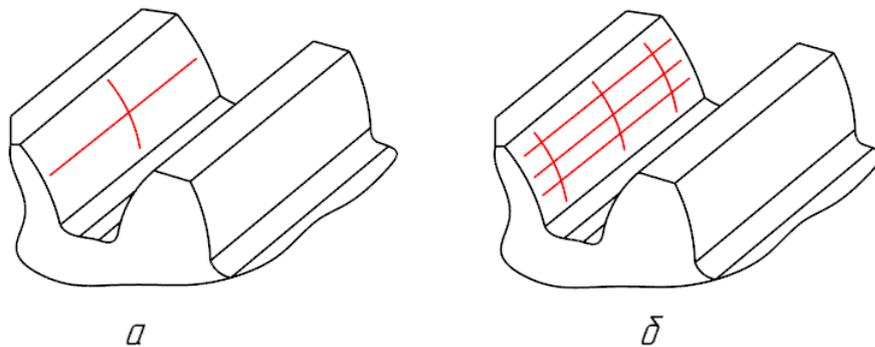


Рисунок 2.1 – Стандартная стратегия измерения боковой поверхности зуба по стандартам серии ISO

Наиболее рационально проводить контроль боковой поверхности зубьев особенно на КИМ по измерению координат точек, расположенных в виде сетки [56]. Для этого необходимо определить шаг сетки, в пределах которого не ожидается резкого изменения параметров. В этом случае, если принять число необходимых измерений за генеральную совокупность, то оно с достаточной степенью риска может быть представлена объемом выборки [35, 102, 103].

2.1 Возможность использования координатного метода при контроле геометрических параметров зубчатых колес

Современное состояние производственных процессов позволяет говорить о возможности обеспечения их высокой стабильности. Они дают соответствующие характерные отклонения формы и расположения поверхностей, что позволяет перейти к разработке на основе теории вероятности конкретных для контроля каждой поверхности метрологических моделей [45, 47] и оптимизации на их основе методов контроля.

Указанное выше обеспечивается единообразием качественных характеристик поверхностей деталей, получаемых при использовании однотипных технологических процессов (выполняемых на единообразном технологическом оборудовании с использованием однотипных приспособлений) понимается получение однородной совокупности получающихся профилей, отклонений формы, расположения и рельефов микрогеометрии обрабатываемых поверхностей. Это позволяет на основе теории вероятности обосновать минимально необходимое число и расположение контрольных точек.

Так математически номинальная боковая поверхность зуба относительно локальной системы координат (рисунок 2.3) описывается уравнениями

$$\begin{cases} X_i = r_i \cos(\varphi_{0z} + \delta_i) \\ Y_i = r_i \sin(\varphi_{0z} + \delta_i), \\ Z_i = var \end{cases} \quad (2.1)$$

где $\delta_i = \operatorname{tg} \alpha_i - \alpha_i$;

$$\cos \alpha_i = \frac{r}{r_b};$$

$$R_b = m_n Z \cos \alpha_n \text{ (в большинстве случаев } \alpha_n = 20^\circ \text{);}$$

r_i – радиус-вектор i – ой точки профиля зуба;

φ_{0z} – угол начала построения эвольвенты зуба Z_K .

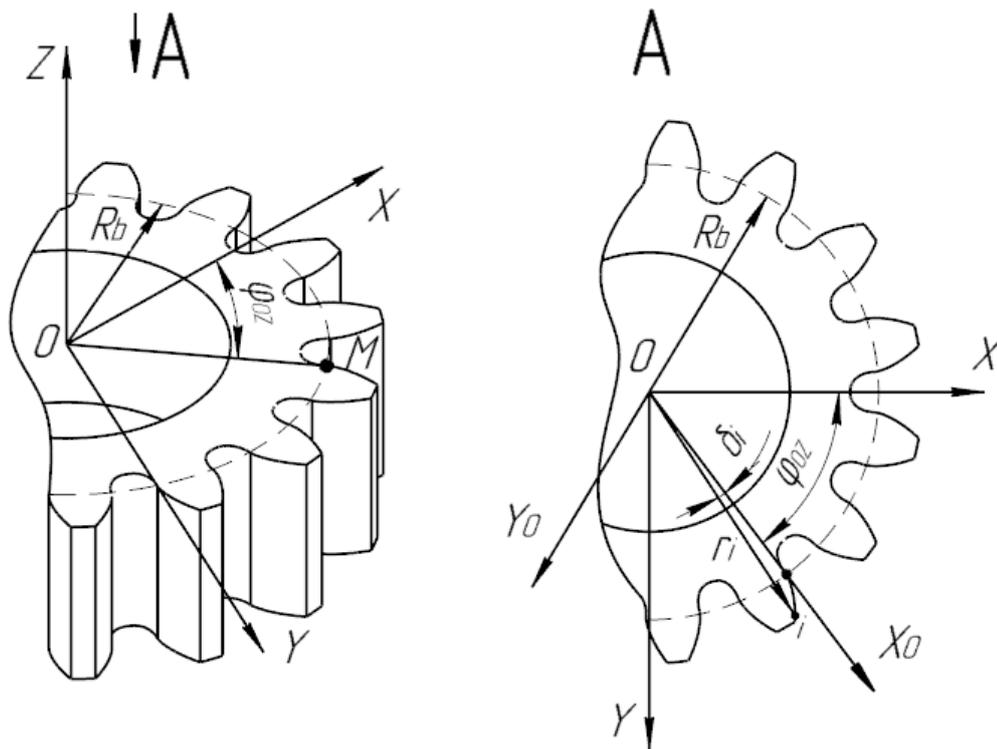


Рисунок 2.3 – Локальная система координат и основные показатели боковой поверхности зубьев

Как видно из (2.1), математически поперечная и продольная форма зубьев не связаны между собой. В техническом варианте на станке за формирование данных направлений отвечают разные механизмы, жесткость которых реализуется в различных направлениях, поэтому возникающие в процессе изготовления искажения по разным направлениям также мало зависимы. Это с достаточной вероятностью позволяет рассматривать эти искажения как независимые.

В [85] указывалось, что искажение контролируемой поверхности является результатом суммарного воздействия различных факторов, имеющих различную интенсивность и частоту проявления, что позволяет произвести его спектральное разложение. Анализ литературных данных показывает, что погрешности боковой поверхности зубьев, если не рассматривать погрешности изношенного оборудования и не учитывать случайные выбросы, условно можно представить в виде совокупности трех групп:

- низкочастотных;

- среднечастотных;
- высокочастотных.

При изготовлении зубчатых колес такими способами как зубодолбление, зубофрезерование либо же зубошлифование, проявляются все виды погрешностей, различием является лишь уровень проявления каждой из составляющих.

Низкочастотными погрешностями (рисунок 2.4, а) в поперечном сечении зуба следует считать погрешности, отклонения формы эвольвенты, связанного с: колебанием диаметра начальной окружности (ΔR_b), неправильной настройки станка, погрешностью заточки (правки) и установки инструмента. В продольном направлении данной погрешностью будет являться погрешность направления зуба (F_β).

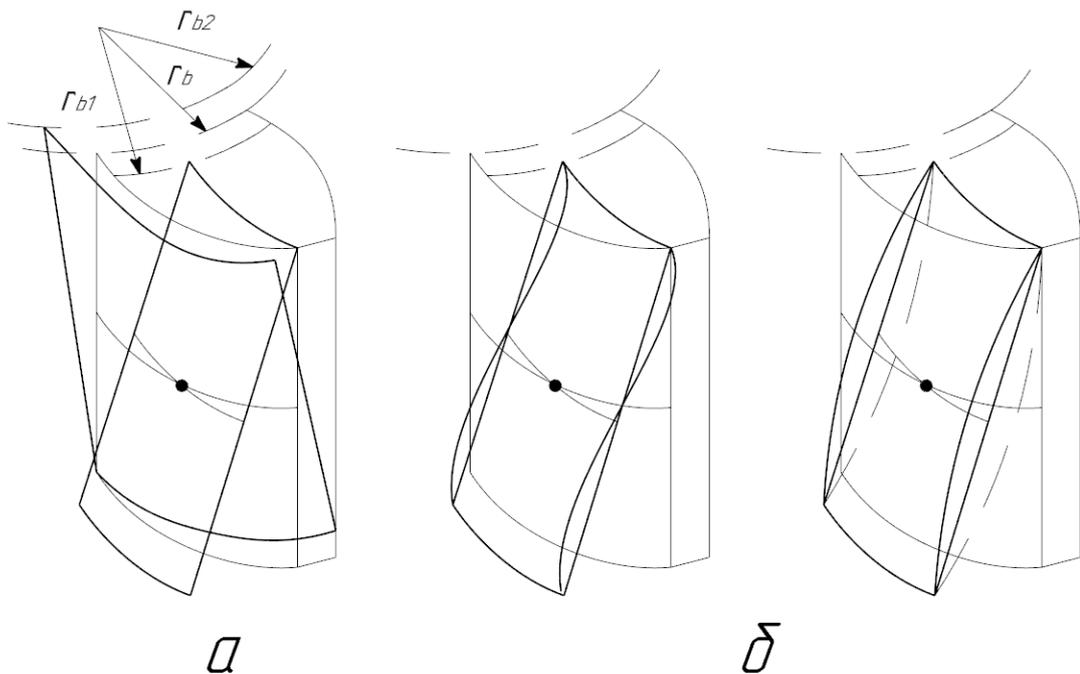


Рисунок 2.4 – Формы основных погрешностей зубообработки

а – низкочастотные, б – среднечастотные

Среди среднечастотных погрешностей (рисунок 2.4, б) наиболее часто встречаются такие разновидности, как: изменение формы эвольвенты по отношению к эталонной (выпуклые и вогнутые участки); изменение положения зуба относительно оси колеса; совокупное проявление изменения формы эвольвенты и положения зуба относительно оси зубчатого колеса, колебание направляющей зуба

вдоль оси колеса ($\Delta R_b, F_\beta, f_r$). Причины возникновения среднечастотных погрешностей связаны с малой жесткостью, неправильной настройкой станка, его точностью, износом основных элементов и отклонением формы зуба инструмента от заданной.

К высокочастотным погрешностям (рисунок 1.3) относят погрешности, возникающие из-за так называемых следов остатков резов (огранка, «рябь») при обработке зубьев. В данном случае, качество изготовления боковых поверхностей зубчатых колес зависит от количества резов и величины вертикальной подачи зуборезной фрезы вдоль оси колеса. Однако, такие погрешности встречаются только при фрезеровании зубьев. Так, процедурой шлифования достигается минимизация влияния высокочастотных погрешностей, ввиду «доводки» поверхности зубчатого колеса до качества, соответствующей той или иной степени точности.

Низкочастотная погрешность характеризуется постоянным нарастанием или убыванием вдоль профиля зуба, причем характер реального профиля близок к эвольвенте с измененным радиусом основной окружности R_b . Поэтому для ее определения в одном сечении не требуется большого количества замеров [76].

Среднечастотные погрешности являются циклическими по отношению к профилю зуба и содержат не более 2-х периодов, форму которых можно условно принять как синусоидальную кривую. Это также требует ограниченного числа замеров.

Высокочастотные погрешности, являющиеся результатом действия отдельных резов и уровня осевой подачи инструмента при обработке, являются регулярными с регламентированными шагами. Практически она образуют сетку с близкими по высоте выступами (рисунок 1.3).

Чтобы определить указанные выше погрешности по всей поверхности зуба необходимо также задать координатную сетку замеров, которая позволила бы получить при минимальном их количестве с заданным уровнем вероятности достоверные сведения о качестве поверхностей зубьев.

Низкочастотные погрешности можно представить как результат изменения параметров: φ_{0z} , α_n и установления взаимосвязи между координатой Z_i и приращением угла φ_{0z}

$$\varphi_{0i} = \varphi_{0z} + \varphi_{00} + Z_i \operatorname{tg} \beta_z, \quad (2.2)$$

где φ_{00} – начальное угловое отклонение положения боковой поверхности зуба от номинального φ_{0z} ;

β_z – угол наклона зуба.

В системе (2.1), неизвестными являются 3 параметра: α_n , φ_{00} и β_z , которые могут быть определены измерением координат 4 точек ($X_i, Y_i, Z_i, i = 1 \dots 4$), близких по расположению к краям контролируемой поверхности, при этом каждые две точки, различные по высоте должны лежать на одном радиусе. Определение вышеуказанных параметров производится по следующим зависимостям:

$$\begin{cases} \varphi_{0z} + \varphi_{00} + \delta_1 = \operatorname{arctg} \frac{Y_1}{X_1}, \\ \varphi_{0z} + \varphi_{00} + \delta_2 = \operatorname{arctg} \frac{Y_2}{X_2}, \end{cases} \quad (2.3)$$

откуда: (2.4)

$$\operatorname{arctg} \frac{Y_2}{X_2} - \operatorname{arctg} \frac{Y_1}{X_1} = \delta_2 - \delta_1, \quad (2.5)$$

при: (2.6)

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \operatorname{tg} \alpha_1 - \alpha_1; \quad \delta_2 = \operatorname{tg} \alpha_2 - \alpha_2, \\ r_1 &= \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}; \quad r_2 = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2}, \\ \cos \alpha_1 &= \frac{r_1}{r_b}; \quad \cos \alpha_2 = \frac{r_2}{r_b}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где r_1 – радиусы 1 и 3 контрольных точек;

r_2 – радиусы 2 и 4 контрольных точек.

Представленная система уравнений является трансцендентной и уравнение (2.7) может быть определено методом подбора, начиная с R_b , определенного по (2.1). Фактическое же значение $\alpha_{n\phi}$ может быть определено:

$$\alpha_{n\phi} = \arccos \frac{2R_b}{m_n Z}. \quad (2.8)$$

После определения R_b и δ_1 , зная исходное значение φ_{0z} , из (2.3) можно определить φ_{00} .

Угол наклона зуба β_z определится по координатам двух точек ($i = 1, 3$), лежащих на разных уровнях, но имеющих близкие радиусы

$$tg\beta_z = \frac{m_n Z}{2} \cdot \frac{\left(\arctg \frac{Y_3}{X_3} - \arctg \frac{Y_1}{X_1} \right)}{Z_3 - Z_1}. \quad (2.9)$$

Подставив параметры из системы (2.1), можно построить аналитическую модель аппроксимирующей поверхности. Сравнив ее с номинальной, можно определить величину погрешностей, максимальное значение ввиду формы принятой модели контроля будет находиться на краях профиля зуба. Так как обычно отклонения определяются по нормали к номинальной поверхности, а номинальная боковая поверхность зуба принята параллельной оси, то отклонения профиля будут лежать в нормальных к оси колеса сечениях с координатами $Z_{1K} = 0$ и $Z_{1K} = h_3$, где h_3 – высота зуба колеса. Погрешность будет определяться перпендикулярно профилю эвольвенты зуба по направлению радиуса кривизны.

Проведя оценку среднечастотных отклонений относительно формы зуба с низкочастотными погрешностями можно сделать следующее заключение:

- в случае, когда низкочастотная поверхность перекрывается полупериодом среднечастотной, форму данного полупериода можно принять в виде участка гладкой теоретической поверхности второго порядка;
- в случае, когда низкочастотная поверхность перекрывается периодом среднечастотной, то ее форму можно принять в виде двух участков гладких теоретических поверхностей второго порядка.

Поверхности второго порядка типа сфера, эллипсоид, гиперболоид и т.п. описываются уравнением:

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0. \quad (2.10)$$

$$\delta_i = \operatorname{tg} \alpha_i - \alpha_i; \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} X_i = r_i \cos(\varphi_{0z} + \delta_i) \\ Y_i = r_i \sin(\varphi_{0z} + \delta_i) \end{cases}; \quad \begin{cases} X_K = r_b \cos(\varphi_{0z} + \delta_i + \alpha_i) \\ Y_K = r_b \sin(\varphi_{0z} + \delta_i + \alpha_i) \end{cases}; \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} X_0 = \frac{Y_K - Y_i}{X_K - X_i} (Y_0 - Y_K) - X_K, \\ Z_0 = \operatorname{const}. \end{cases} \quad (2.15)$$

Приравняв (2.3, 2.4) и (2.15), решив методом подбора получаемое уравнение, определяют координаты точки эвольвенты (X_{01} и Y_{01}), для которой находится погрешность реального профиля. Приравняв (2.10) и (2.15), определяют координаты точки аппроксимирующей поверхности (X_{0A} и Y_{0A}), по которой определяется данная погрешность

$$\Delta_i = \sqrt{(X_{01} - X_{0A})^2 + (Y_{01} - Y_{0A})^2}. \quad (2.16)$$

Для определения аппроксимирующей поверхности необходимо задать 10 контрольных точек, достаточно равномерно расположенных по контролируемой поверхности. Предлагается в качестве таких точек выбрать точки, расположенные близко к края контролируемой поверхности, обеспечивающим точность измерения, а также в середине данной поверхности (рисунок 2.4, а). В результаты контроля могут быть включены как показания по контрольным точкам, так и по точкам, определяемым по дополнительным требованиям.

В случае, когда реальна поверхность зуба представлена полным периодом среднечастотных погрешностей (рисунок 2.4, б) рекомендуется представить ее в виде двух областей, охватывающих боковую поверхность зуба до середины высоты и провести указанные выше расчеты погрешностей отдельно для каждой половины зуба. В этом случае необходимо провести контроль 17 точек, предлагаемое расположение которых представлено на рисунке 2.6, б.

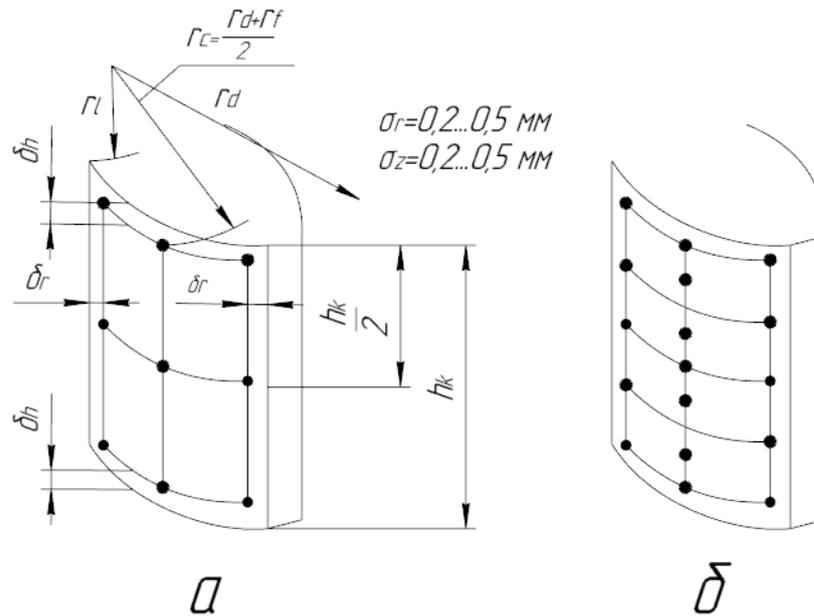


Рисунок 2.6 – Рекомендуемое расположение контрольных точек
 а – полупериод среднечастотных погрешностей; б – полный период среднечастотных погрешностей

Высокочастотные погрешности при обработке зубьев зубчатых колес в общем случае в поперечном сечении являются следствием пересечения следов различных резов ($S_{окр}$), а в продольном – величиной осевой подачи инструмента (S_0) (рисунок 1.3) и образуют сетку регулярных выступов на боковой поверхности зуба. Число резов ограничивается или величиной окружной подачи $S_{окр}$ для процессов долбления и шлифования зубьев или числом зубьев Z_ϕ и заходов I_ϕ червячной фрезы при червячном фрезеровании. Следует отметить, что при чистовой обработке число резов n_p вдоль профиля зуба при червячном фрезеровании и долблении примерно одинаковы, а при шлифовании их может быть даже больше. Поэтому за основу расчетов принято чистовое фрезерование зубчатых колес червячными фрезами.

Для чистового фрезерования зубчатых колес с модулем $m_n = 1 \dots 6$ мм, согласно [23] используются однозаходные $I_\phi = 1$ червячные фрезы с наружным диаметром $D_\alpha = 50 \dots 110$ мм и числом зубьев $Z_\phi = 12 \dots 14$. Количество резов, формирующих боковую поверхность зуба соответствует углу контакта (рисунок 2.7).

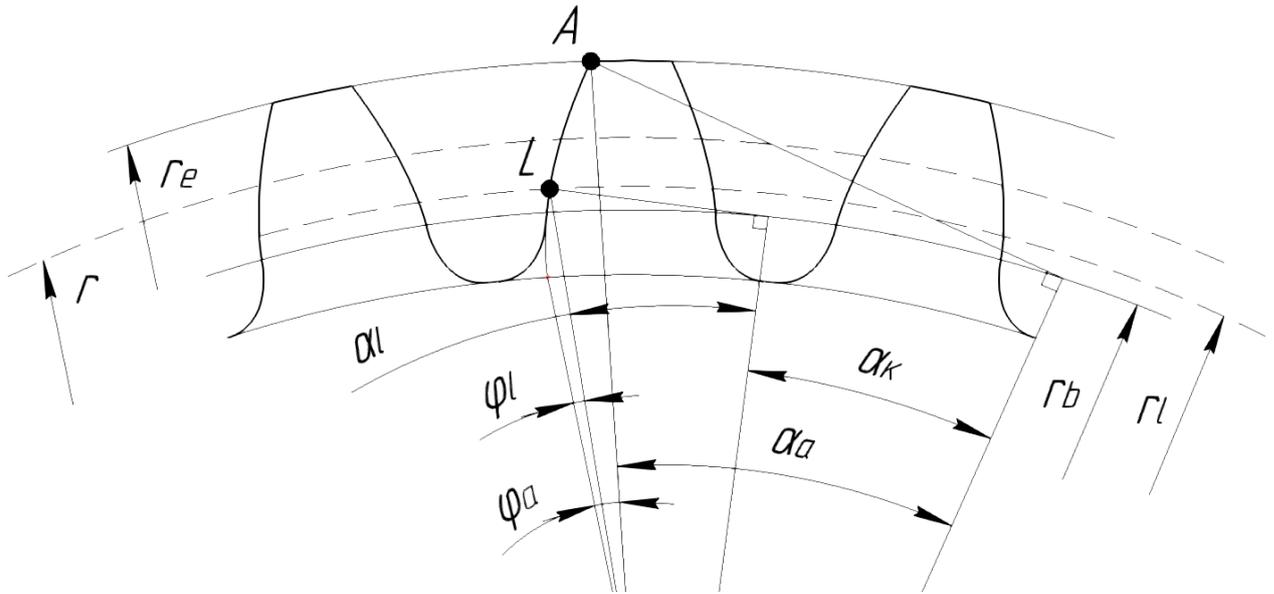


Рисунок 2.7 – Определение количества резов на боковой поверхности зуба

$$\alpha_k = (\alpha_a - \delta_a) - (\alpha_l + \delta_l), \quad (2.17)$$

где α_a и α_l – углы зацепления в точках начала l и конца a эвольвентного профиля зуба

$$\alpha_a = \arccos \frac{r_b}{r_a}; \quad \alpha_l = \arccos \frac{r_b}{r_l}; \quad (2.18)$$

$r_a = r_e$ – радиус окружности выступов, равный $r_e = r + h_a^* m_n$ для некорректированных колес;

h_a^* – коэффициент головки зуба, в большинстве случаев равный 1;

r – радиус делительной окружности колеса

$$r = 0,5 \cdot m_n Z_K; \quad (2.19)$$

Z_K – число зубьев колеса;

r_l – радиус окружности начала эвольвентного профиля зуба

$$r_l = r - h_f^* m_n - c m_n, \quad (2.20)$$

где h_f^* – коэффициент ножки зуба, в большинстве случаев равный 1;

c – коэффициент перекрытия участка зацепления (обычно 0,05...0,15);

$$\delta_l = \operatorname{tg} \alpha_l - \alpha_l; \quad \delta_a = \operatorname{tg} \alpha_a - \alpha_a. \quad (2.21)$$

Для оценки числа резов наиболее рационально рассматривать колеса (без коррекции) с наиболее используемыми минимальными и максимальными числами зубьев ($Z_K = 20; 100$) и модулями ($m_n = 2; 6$ мм). При $r_l < R_b$ принимается $r_l =$

R_b . Для однозаходных фрез в зависимости от Z_ϕ угловая подача на зуб составит

$$\varphi_K = \frac{360^\circ}{Z_\phi Z_K}, \text{ а число резов } n_p = \frac{\alpha_K}{\varphi_K} \text{ (таблицы 2.1–2.3).}$$

Таблица 2.1 – Расчет числа резов

m_n	Z_K	r	r_b	r_a	r_l	α_a	α_l	δ_a	δ_l	α_K
2	20	20	18,794	22	18,8	31°19'	1°27'	3°33'	1"	33°25'
	100	100	93,969	102	97,8	22°53'	16°5'	1°18'	26'	7°40'
6	20	60	56,382	66	56,4	31°19'	1°27'	3°33'	1"	33°25'
	100	300	281,908	306	293,4	22°53'	16°5'	1°18'	26'	7°40'

Таблица 2.2 – Определение величины шага между резами в начальный момент

α_K	Z_ϕ	φ_Z	φ_K	n_p	X_1	Y_1	α_2	r_2	δ_2	X_2	Y_2	l_{12}
33°25'	12	30°	1°30'	22,27	18,8	0,0001	2°57'	18,82	9"	18,82	0,0008	0,02
	14	25°43'	1°17'	26,1	18,8	0,0001	2°44'	18,82	7"	18,82	0,0006	0,02
7°40'	12	30°	18'	25,54	97,8	0,746	16°21'	97,93	27'31"	97,92	0,784	0,126
	14	25°43'	15'25"	29,81	97,8	0,746	16°16'	97,89	25'23"	97,88	0,723	0,083
33°25'	12	30°	1°30'	22,27	56,4	0,0003	2°57'	56,46	9"	56,46	0,0024	0,06
	14	25°43'	1°17'	26,1	56,4	0,0003	2°44'	56,44	7"	56,44	0,0019	0,04
7°40'	12	30°	18'	25,54	293,39	2,219	16°21'	293,79	27'31"	293,78	2,351	0,411
	14	25°43'	15'25"	29,81	293,39	2,219	16°16'	293,66	25'23"	293,65	2,168	0,265

Таблица 2.3 – Определение величины шага между резами в конце обработки

α_K	Z_ϕ	φ_K	X_n	Y_n	α_{n-1}	r_{n-1}	δ_{n-1}	X_{n-1}	Y_{n-1}	$l_{n,n-1}$
33°25'	12	1°30'	21,958	1,362	30°13'	21,75	3°9'	21,72	1,195	0,29
	14	1°17'	21,958	1,362	30°23'	21,78	3°13'	21,75	1,222	0,251
7°40'	12	18'	101,974	2,314	22°38'	101,81	1°15'	101,78	2,221	0,215
	14	15'25"	101,974	2,314	22°40'	101,83	1°16'	101,8	2,251	0,185
33°25'	12	1°30'	65,873	4,086	30°13'	65,25	3°9'	65,15	3,585	0,88
	14	1°17'	65,873	4,086	30°22'	65,35	3°13'	65,25	3,667	0,75
7°40'	12	18'	305,921	6,942	22°38'	305,43	1°15'	305,36	6,663	0,626
	14	15'25"	305,921	6,942	22°40'	305,50	1°16'	305,42	6,753	0,535

Как видно из таблиц 2.1–2.3, число резов n_p при обработке практически мало зависит от модуля и числа зубьев колеса и составляет значительные величины. Шаг между резами по длине эвольвенты изменяется и в начальный момент составит l_{12} (рисунок 2.8) – расстояние между первым и вторым резами, а в конце обработки $l_{i,i+1}$ – расстояние между предпоследним и последним резами. Здесь

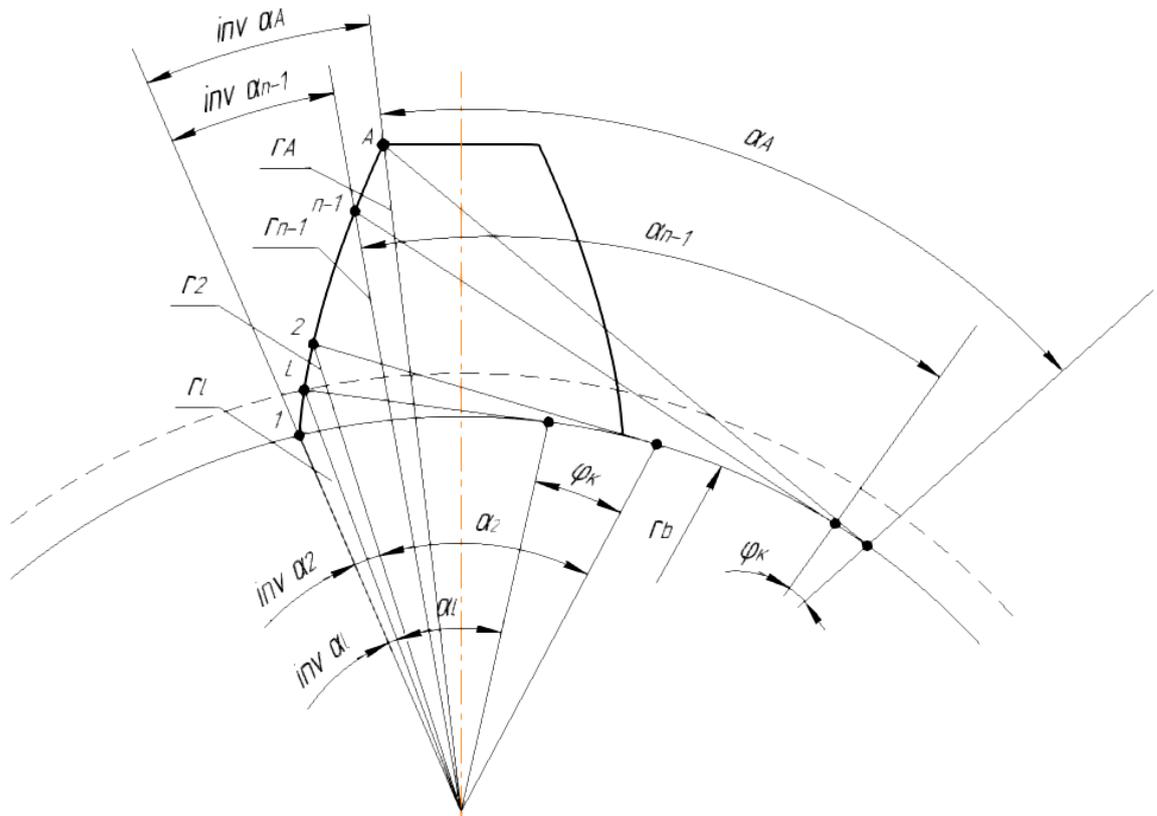


Рисунок 2.8 – Определение величины шага между резами

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \delta_l + \alpha_l + \varphi_K; \delta_2 = \operatorname{tg} \alpha_2 - \alpha_2; \quad (2.22)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{n-1} = \delta_l + \alpha_l - \varphi_K; \delta_{n-1} = \operatorname{tg} \alpha_{n-1} - \alpha_{n-1}; \quad (2.23)$$

$$r_i = \frac{R_b}{\cos \alpha_i}; \quad (2.24)$$

$$\begin{cases} X_1 = r_l \cos \delta_l, \\ Y_1 = r_l \sin \delta_l, \end{cases} \begin{cases} X_2 = r_2 \cos \delta_2, \\ Y_2 = r_2 \sin \delta_2, \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\begin{cases} X_n = r_a \cos \delta_a, \\ Y_n = r_a \sin \delta_a, \end{cases} \begin{cases} X_{n-1} = r_{n-1} \cos \delta_{n-1}, \\ Y_{n-1} = r_{n-1} \sin \delta_{n-1}, \end{cases} \quad (2.26)$$

$$l_{n,n-1} = \sqrt{(X_n - X_{n-1})^2 + (Y_n - Y_{n-1})^2}. \quad (2.27)$$

Как видно из таблиц 2.2 и 2.3, шаг резов увеличивается от R_b к r_e . С достаточной степенью точности величину каждого шага можно представить зависимостью:

$$l_{i,i+1} = \frac{l_{n,n-1} - l_{12}}{n_p} (i - 1) + l_{12}, \quad (2.28)$$

а положение точек касания резов вдоль боковой поверхности зуба, начиная от основной окружности:

$$L_i = \sum_{i=1}^i l_{i,i+1} + f_0 = \frac{l_{n,n-1}-l_{12}}{2n_p} (i-1)^2 + l_{12}(i-1) + f_0, \quad (2.29)$$

где f_0 – положение первого реза относительно окружности начала эвольвентного профиля зуба (точно неизвестно, но лежит в пределах $0 \dots l_{12}$).

Выступы профиля (точки пересечения резов) находятся близко к середине шагов резов:

$$L_{\text{выст}i} = \frac{l_{n,n-1}-l_{12}}{2n_p} (i-1)^2 + l_{12}(i-1) + f_0 + 0,5l_{i,i+1}. \quad (2.30)$$

В осевом направлении выступы профиля располагаются со смещением на окружную подачу $S_{\text{окр}} = 0,8 \dots 2$ мм/оборот [23] для чистового фрезерования в зависимости от степени точности зубьев (обычно 0,8, 1, 1,2 мм/об). Расположение выступов вдоль оси колеса можно описать зависимостью:

$$H_j = S_{\text{окр}}(j-1) + h_0, \quad (2.31)$$

где j – номер прохода при фрезеровании,

h_0 – положение первого прохода относительно торцевой поверхности колеса (точно неизвестно, но лежит в пределах $0 \dots S_{\text{окр}}$).

Таким образом, на боковой поверхности зубьев формируется сетка «высокочастотных», регулярных погрешностей в виде выступов (рисунок 2.9), часть которых должна быть определена при координатном измерении. Учитывая малые углы давления профиля в верхней точке выступа контроль на площадке радиуса 0,1 мм в самом худшем случае может дать погрешность измерения 0,0013 мм. Поэтому результаты контроля в пределах данного участка можно считать достоверными.

При координатном контроле точки контроля на боковой поверхности зуба также располагаются по координатной сетке и также в регулярной форме (с постоянными шагами). В этом случае шаги контрольной сетки не должны быть кратны шагам выступов. Так, например, при расположении выступов при $S_{\text{окр}} = 1$ мм/об и высоте зуба $h_K = 20$ мм при 8 рядах и осевом шаге контрольной сетки $p_{\text{ос}} = 2,3$ мм, контрольные точки попадут на выступы профиля не менее 3-х раз. При переменном шаге выступов в радиальном направлении для колеса $m_n = 2$ мм и $Z_K = 20$ достаточно 5 рядов сетки с шагом $p_{\text{окр}} = 0,9$ мм. При этом контролироваться будет

только незначительная часть выступов. Однако, учитывая регулярность и идентичность их повторения результаты контроля в некоторых точках дадут повышенное значение отклонения профиля f_f [93].

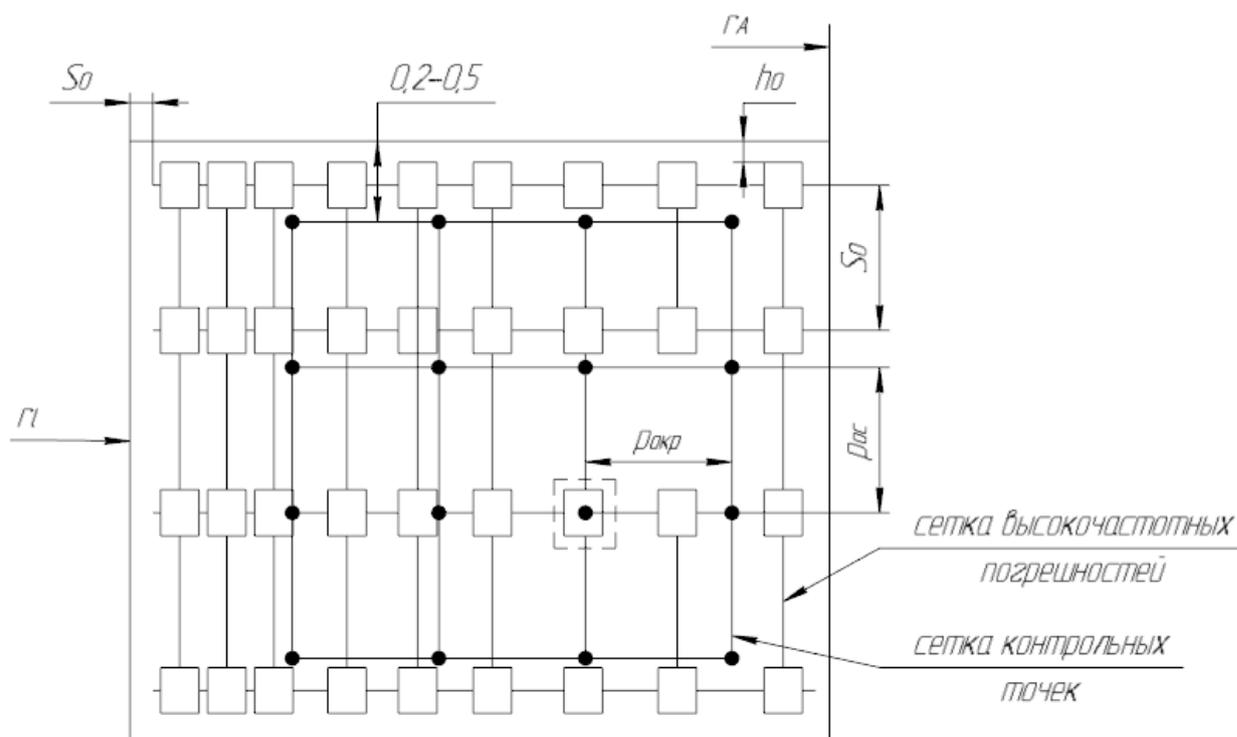


Рисунок 2.9 – Формы сеток погрешностей и контрольных точек

Суммарное количество контрольных точек в таком случае составит 25...30. Наличие значительного количества контрольных точек и регулярность аппроксимационных поверхностей позволяет предположить, что величина погрешности профиля с достаточной вероятностью может быть определена по результатам контрольных замеров.

Максимальная величина погрешностей, являющихся результатом прерывистых резов δ_r определяется на вершине зубьев, может быть определена (рисунок 2.10):

$$\delta_r = \frac{l_{n,n-1}}{2 \sin \varphi_k} \left(\frac{1}{\cos \varphi_k} - 1 \right), \quad (2.32)$$

что согласно данным таблицы 2.3 составит не более 0,0013 мм. Размер погрешностей, связанных с осевой подачей фрезы Δ_r , при диаметре фрезы $D_\phi = 100$ мм и $S_{oc} = 1$ мм/об

$$\delta_{oc} = \frac{D_\phi}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_\phi}{2}\right)^2 - \left(\frac{S_{oc}}{2}\right)^2} \quad (2.33)$$

не превысит 0,0025 мм. Данные погрешности практически не влияют на работоспособность колес и находятся в пределах погрешности измерений любых средств контроля, поэтому могут не учитываться при контроле качества колес, хотя частично могут быть и учтены [90]. Большие погрешности могут возникнуть как результат деформации металла при резании частично отслежены при контроле [66, 68].

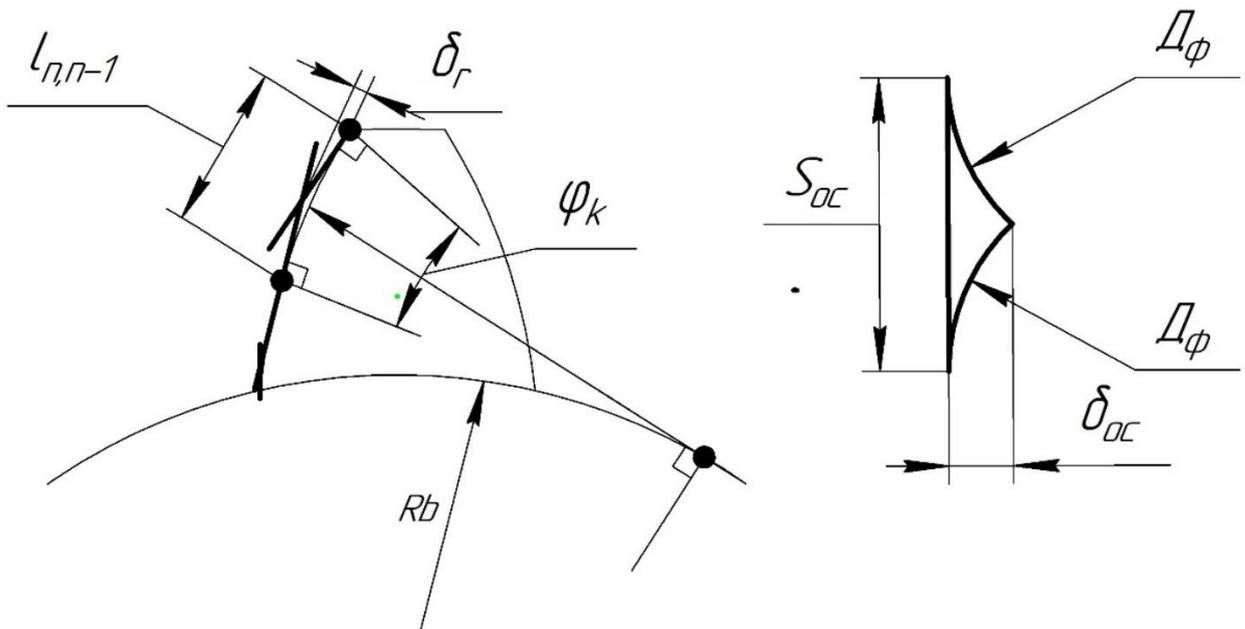


Рисунок 2.10 – Расчет погрешности резов δ_r и осевой подачи S_{oc} («ряби»)

Для большей определенности и однозначного определения эвольвенты в каждом поперечном и продольном сечении боковой поверхности зуба колеса (для определения профиля эвольвенты) рекомендуется проводить контроль в 5...6 точках, создавая контрольную сетку 5×5 или 5×6 измерений [69].

Однако, целесообразнее всего обосновать объем контрольных операций на основе статистических методов управления качеством продукции.

Так, если разбить рассматриваемую поверхность на отдельные ячейки (сетку) и проводить контроль по центрам ячеек, то требуется учитывать как их необходимую размерность, так и концентрацию в различных областях поверхности. При этом следует обосновать стабильность размера поверхности в пределах одной ячейки.

Данное обоснование может базироваться на основных технологических приемах изготовления зубчатых колес [100]. В промышленности наиболее широко распространены методы червячного фрезерования или долбления зубьев, для реализации которых рекомендуются следующие режимы обработки:

- для чистовой обработки зубьев число резов по поперечному профилю составляет более 20 (см. выше);
- осевая подача инструмента вдоль зуба находится в пределах 0.8...1 мм/об [78].

Это приводит к формированию на боковой поверхности зубьев также «сетки» с выступами по углам ячеек (рисунок 1.3). Ориентируясь на основные параметры зубчатых колес, используемых в машиностроении (модуль $m_n = 1.5...6$ мм, число зубьев $Z = 20...100$, длина зуба вдоль оси $h = 5...60$ мм) размеры $a \times b$ максимальных ячеек данной сетки составят от 0,2×0,4 до 0,7×1 мм. Следует помнить, что формируемые режимами обработки «выступы» не должны превышать допуски на формируемые комплексные параметры зубчатых колес, то есть находиться в пределах микрометров. Опираясь на предположение, что «любая регулярная технология накладывает более или менее жесткие связи на взаимное расположение близких точек», можно предположить, что в пределах половины размера ячейки при чистовой обработке изменение высоты участка не превысит 0,003 мм.

Ввиду малых размеров ячеек это позволяет представить боковую поверхность зуба колеса как равномерную сетку положения контрольных точек на рабочей поверхности зуба колеса с числом точек вдоль высоты n_h и длины n_l зуба. Учитывая, что высота зуба в радиальном направлении для большинства колес не превышает $2m_n$, количество ячеек $N_{я}$ данной сетки определится как:

$$N_{\text{я}} = \frac{2m_n}{a} \cdot \frac{h}{b}, \quad (2.34)$$

Для колес с $m_n = 1,5$ мм и $h = 5$ мм, $N_{\text{я}} = 94$ ($n_h = 8$ и $n_l = 13$), а для колес с $m_n = 6$ мм и $h = 60$ мм, $N_{\text{я}} = 2880$ ($n_h = 24$ и $n_l = 120$).

Данный объем измерений составит генеральную совокупность, которая является значительной и вряд ли приемлема для проведения измерений. Однако использование метода статистического контроля качества продукции [41], который широко применяется в промышленности, позволяет с достаточной достоверностью снизить объемы контроля [7, 13, 18].

Основные погрешности зубьев зубчатого колеса определяются относительно номинально их профиля и положения. Следует помнить, что все погрешности изготовления колес, связанные с ошибками настройки оборудования, а также погрешности формы инструмента являются систематическими, имеют значительные размеры и регулярность в повторении. Поэтому для их определения не требуется такого большого количества измерений. Погрешности, связанные со средними величинами отжимов и жесткости оборудования могут быть частично компенсированы настройкой. Погрешности, связанные с колебаниями в зазорах и самой технологической системы, колебанием твердости материала заготовки и т.п. являются случайными, но единичные отклонения от заданного профиля из всей генеральной совокупности не снижают качества их работоспособности. Поэтому для определения объемов измерений возможно применение рекомендаций метода одноступенчатого выборочного контроля [24].

Основой использования данного метода является задание приемлемого уровня качества, выраженного в проценте несоответствующих единиц продукции – AQL. В рассматриваемом случае в зависимости от степени точности изготовления колес возможно принятие риска пропуска несоответствующих значений параметров в точках контроля AQL в пределах 1...2,5% [24].

Согласно оперативному плану одноступенчатого контроля при отсутствии доминирующих факторов, влияющих на качество изготовления зубчатых колес, ориентируясь на общий уровень контроля для $N_{\text{я}} = 94$ следует принять код выборок

F или D, а для $N_{я} = 2880$ – K или H. Данным кодам соответствуют объемы выборок (количество измерений): F = 20; D = 8; K = 125; H = 50 (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Коды объемов выборок

Объем партии				Специальный уровень контроля				Общий уровень контроля			
				S - 1	S - 2	S - 3	S - 4	I	II	III	
От	91	до	150	включ.	B	B	C	D	D	F	G
»	1201	»	3200	»	C	D	E	G	H	K	L

Для малых по размерам колес наиболее рекомендуемые коды выборок F = 20 и G = 32, что позволяет при контроле принимать изделия с выходящими за пределами результатами измерений в 1 или 2 точках контроля ($A_{с} = 1 \dots 2$). В этом случае общее возможное количество ячеек, имеющих значение параметра (размера), вышедшего за пределы допустимого, не превысит $AQL = 2.5\%$ (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Одноступенчатые планы при нормальном контроле

Код объема выборки	Объем выборки	Приемочный уровень качества AQL (% несоответствующих единиц продукции и число несоответствий $A_{с}$ на 100 единиц продукции) нормальный контроль				
		0.4 $A_{с}$	0.65 $A_{с}$	1 $A_{с}$	1.5 $A_{с}$	2.5 $A_{с}$
F	20	-	0	0	1	1
G	32	0	0	1	1	2
H	50	0	1	1	2	3
J	80	1	1	2	3	5
K	125	1	2	3	5	7

Для крупных колес объем выборки кода K (125 измерений) предусматривает для $AQL = 2.5\%$ число приемочных несоответствий $A_{с} = 7$. Однако объем измерений слишком велик. Поэтому наиболее рационально использовать код выборок H (50 измерений). В этом случае для $AQL = 2.5\%$ допускается $A_{с} = 3$.

Учитывая неравномерность при изготовлении шага резцов, возможно при контроле принять равномерную сетку расположения точек выборочного контроля, снизив значение $A_{с}$. Количество рядов точек вдоль высоты n_h и длины n_l боковой поверхности зуба следует назначать пропорционально их соотношению:

$$\frac{n_h}{n_l} = \frac{2m_n}{h}. \quad (2.35)$$

Представленный подход позволяет сформировать рекомендации по количеству ячеек контроля на боковой поверхности зубьев (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Рекомендуемые параметры сеток контроля

m_n , мм	n	h в мм												
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
1.5	n_h	4	5	5	5	5	5							
	n_l	5	6	10	10	10	10							
2	n_h		4	5	5	5	5	5						
	n_l		5	6	6	10	10	10						
2.5	n_h			4	5	5	5	5	5					
	n_l			5	6	6	10	10	10					
3	n_h				5	5	5	5	5	7				
	n_l				6	6	10	10	10	10				
4	n_h					5	5	5	5	7	7			
	n_l					6	10	10	10	10	10			
5	n_h						5	5	5	5	7	7		
	n_l						10	10	10	10	10	10		
6	n_h						5	5	5	5	7	7	7	
	n_l						10	10	10	10	10	10	10	10

Приведенные в таблице 2.6 рекомендации могут служить исходными значениями в процессе определения стратегии определения качества зубчатых колес. Окончательные значения параметров сеток могут быть установлены на основе практического применения.

Для повышения достоверности результатов контроля следовало бы проверить повторяемость результатов измерений, для чего необходимо повторить несколько раз контроль по определенному массиву точек.

Оценку показателей качества зубчатых колес следует проводить по левой и правой боковым сторонам не менее чем на 3 зубьях, расположенных в различных зонах зубчатого венца [98]. Равномерное (через 120°) расположение зон контроля дает хорошие результаты при измерении параметров, связанных с кинематическими погрешностями, однако их количество недостаточно для однозначного определения, например, радиального биения, для которого необходимо как минимум 4

точки измерения (3 точки определяют окружность без отклонения формы). Контроль длины общей нормали предполагает измерение пары соседних либо лежащих через 3...4 зуба также как минимум в трех разных зонах, что в сумме требует контроля не менее 6 зубов. То же самое относится и к контролю погрешностей шага зацепления.

Все вышеперечисленное делает необходимым контроль 9 зубьев: 3 из которых расположены через 120° , по 2 зуба, отнесенных от стартового на 1 зуб для контроля погрешности шага, и 3...4 – для контроля длины общей нормали в зависимости от диаметра и модуля зубчатого колеса (рисунок 2.11).

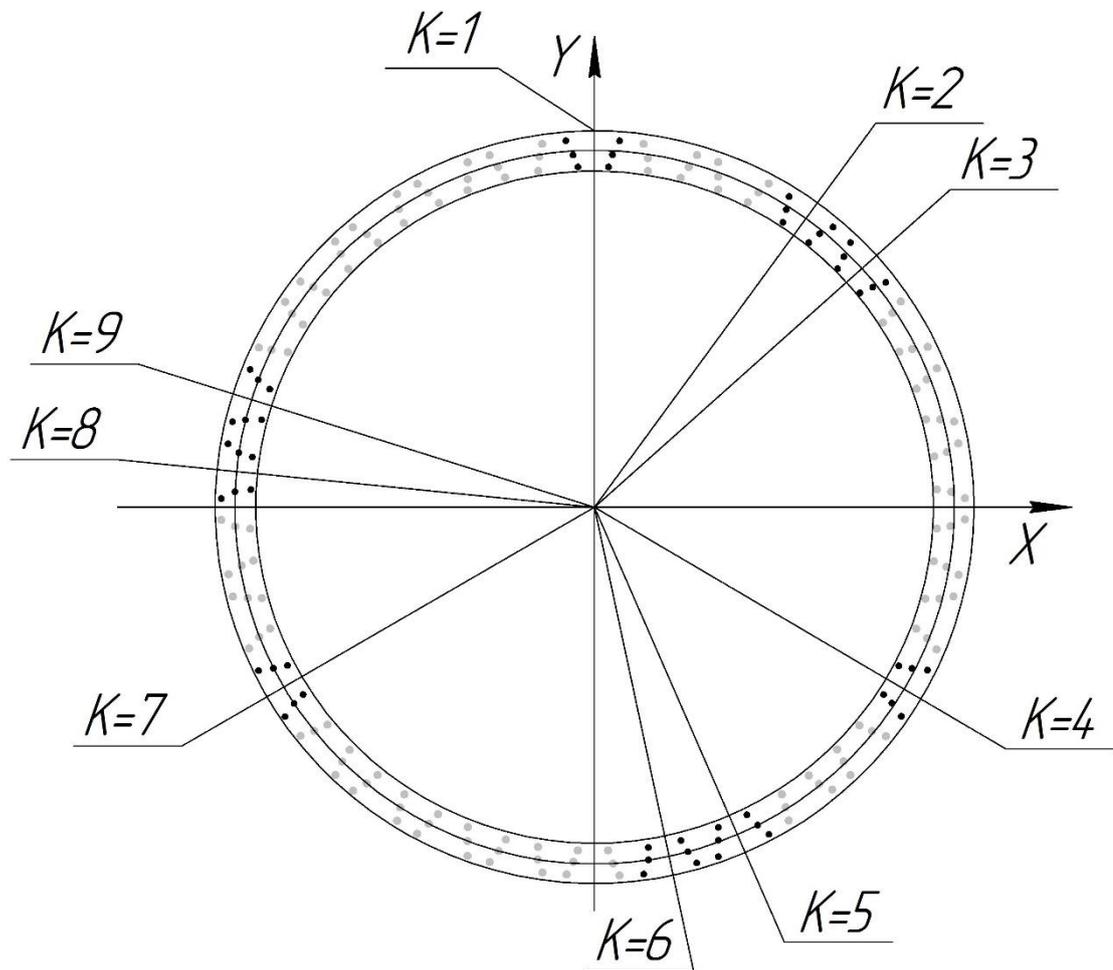


Рисунок 2.11 – Распределение контролируемых боковых поверхностей колеса

Однако, исходя из условий контроля боковой поверхности зуба колеса, наиболее рационально определять параметры контрольных точек относительно центра впадины.

2.2 Определение координат точек контрольной сетки боковой поверхности зубчатого колеса по принятому объему измерений

Расчет координат контрольных точек – одна из основных задач, необходимая для осуществления возможности проведения полуавтоматического контроля зубчатых колес на КИМ. Формирование такого массива данных позволяет освободит оператора КИМ от необходимости в ручном режиме зондировать боковую поверхность зубчатого колеса, минимизируя влияние связанных с этим погрешностей. Расположение контролируемых точек на боковой поверхности зубчатого колеса представляет собой так называемую сетку контроля, размер которой определяется относительно заданной исходной системы координат детали.

При контроле параметров зубчатых колёс на КИМ результаты представляются параметрами (рисунок 2.12) координат точек контрольной сетки боковых поверхностей зубьев справа и слева в пределах рабочих зон контакта относительно центра впадины. Обычно данная сетка задаётся шагами Δ_h , Δ_r и определяет количество уровней ($1 \leq i \leq n_h$) и количество точек на уровне ($1 \leq j \leq n_r$). Зона контроля определяется размерами зубьев (r_e , r_f и h) и рекомендуемыми при контроле отступами δ_r и δ_h [19, 96, 106]:

$$\begin{aligned} n_r &= \text{round} \frac{r_e - r_f - 2\delta_r}{\Delta_r}, \\ n_h &= \text{round} \frac{h_3 - 2\delta_h}{\Delta_h}, \end{aligned} \quad (2.36)$$

что приводит к необходимости корректировки параметров Δ_r и Δ_h :

$$\begin{aligned} \Delta_r &= \frac{r_e - r_f}{n_r}, \\ \Delta_h &= \frac{h}{n_h}. \end{aligned} \quad (2.37)$$

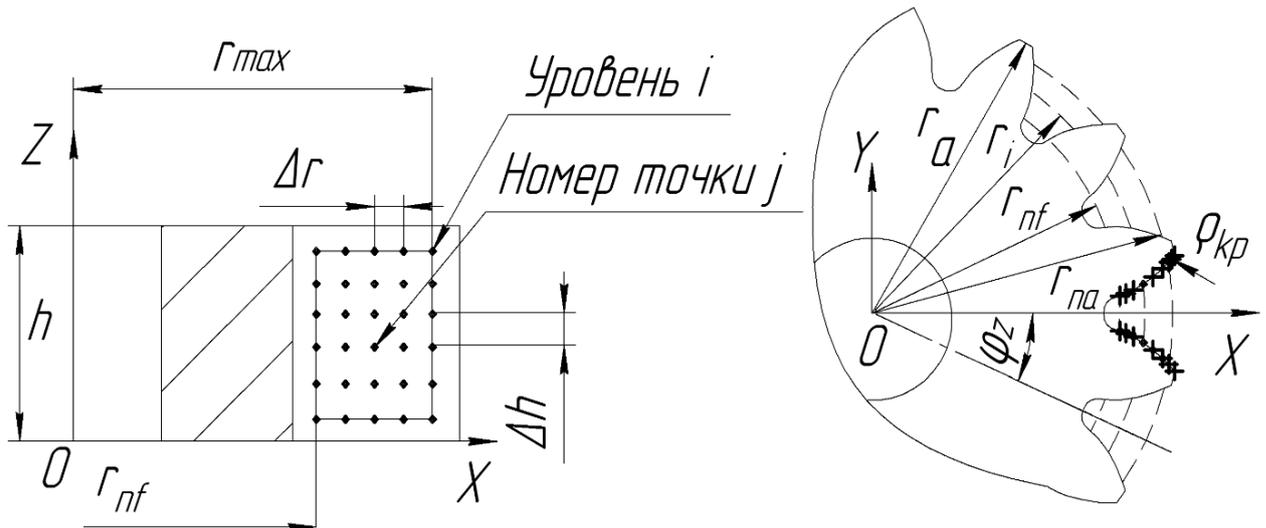


Рисунок 2.12 – Формирование контрольной сетки точек на боковой поверхности зуба

$XYZO$ – локальная измерительная система координат; r_a – наружный радиус колеса; $\rho_{кр}$ – радиус скругления при вершине зуба; r_{na} , r_{nf} – границы контролируемой зоны; h – толщина колеса; Δ_h , Δ_r – шаги сетки точек контроля

Первоначально расчет параметров контрольных точек производится для одной основной впадины. Для нее на расстоянии $Y_0 = r_e + 1$ мм от исходной системы координат, начало которой находится на пересечении оси колеса с торцом, определяется положение опорной точки ($X_{01} = 0$). Далее определяются координаты точек контрольной сетки [56]. Для каждой ее стороны рассчитываются следующие параметры:

$$\begin{cases} r_{max} = r_e - \delta_r, \\ r_{min} = r_L + \delta_r, \\ h_{max} = h_K - \delta_h, \\ h_{min} = \delta_h \end{cases} \quad (2.38)$$

где r_e и r_L – максимальный и минимальный диаметры эвольвентного профиля зуба,

h_K – высота зуба колеса,

δ_r и δ_h – отступы, рекомендуемые нормативными документами (0,2...0,5 мм).

Координаты контрольных точек определяются как:

$$\begin{cases} X_i = r_i \sin t_i; \\ Y_i = r_i \cos t_i; \\ Z_j = \delta_h + \frac{h_{max} - h_{min}}{n - 1} (j - 1). \end{cases} \quad (2.39)$$

С учетом величины возможной коррекции профиля зуба χ и заданных величинах: дополнительного смещении исходного контура E_S и допуска T_n параметр t_j примет значения [21]

$$t_i = \pm \left[\frac{\pi}{2 Z_K} - inv\alpha_n - 2 \left(\chi m_n + E_S - \frac{T_n}{2} \right) tg\alpha_n / (m_n Z_K) + inv\alpha_i \right], \quad (2.40)$$

где $\cos \alpha_i = \frac{r_b}{r_i}, r_i = r_{min} + \frac{r_{max} - r_{min}}{m - 1} (i - 1)$,

i и j – количество точек сетки: j – по образующей, i – по направляющей боковой поверхности колеса,

$Z_K, \alpha_n, \chi, m_n, E_S, T_n$ – параметры колеса.

Расчет параметров контрольных точек сетки на других впадинах (k) производится путем поворота системы координат:

$$\begin{cases} X_{ki} = X_i \sin \varphi_k + Y_i \cos \varphi_k, \\ Y_{ki} = X_i \cos \varphi_k - Y_i \sin \varphi_k, \\ Z_{kj} = Z_j. \end{cases} \quad (2.41)$$

Учитывая, что контролю подлежат только 9 впадин их угловое положение определяется следующим образом:

$$\varphi_k = \frac{2\pi}{Z_K} (k - 1), \quad (2.42)$$

где φ_k – угловое положение k – ой впадины между зубьями при следующих принятых номерах впадин $k_1 = 1; k_2 = 4; k_3 = 5; k_4 = \text{round}\left(\frac{Z_K}{3}\right); k_5 = k_4 + 3; k_6 = k_4 + 4; k_7 = \text{round}\left(\frac{2Z_K}{3}\right); k_8 = k_7 + 3; k_9 = k_7 + 4$ (см. рис.2.10).

Для осуществления возможности автоматического зондирования боковых поверхностей зубчатых колес с помощью ПО КИМ дополнительно для каждой контрольной точки j необходимо задать положение вектора нормали $N_j (N_X, N_Y)$ (рисунок 2.13)

$$\begin{cases} N_X = \sin \omega_j, \\ N_Y = \cos \omega_j, \\ N_Z = 0, \end{cases} \quad (2.43)$$

где $\omega_j = \frac{\pi}{2} - (\varphi_j \pm \alpha_j)$;

φ_j – координатный угол в точке j , $\varphi_j = \arctg \frac{X_j}{Y_j}$;

α_j – угол зацепления в точке j .

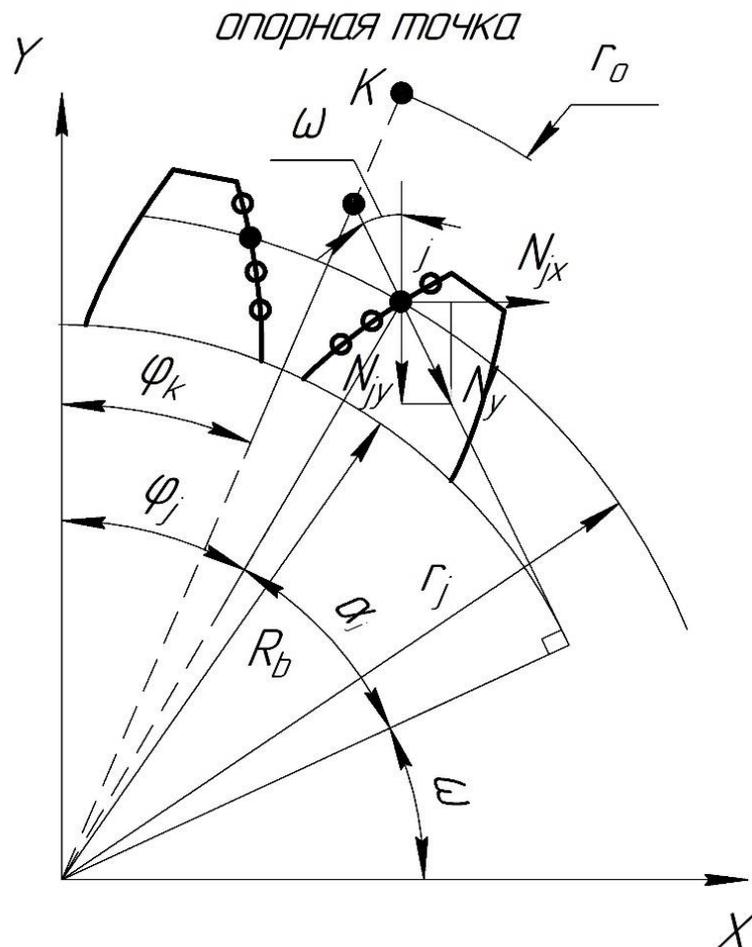


Рисунок 2.13 – Расчет векторов нормали

Дополнительно в базовой плоскости XOY ($Z_k = 0$) для $r_0 = r_e + 1$ мм рассчитываются координаты остальных опорных точек, необходимых для формирования программы контроля на КИМ:

$$\begin{cases} X_{0k} = r_0 \sin \varphi_k, \\ Y_{0k} = r_0 \cos \varphi_k. \end{cases} \quad (2.44)$$

Для расчета координат опорных и контрольных точек было разработано соответствующее ПО. Определение координат контролируемых точек с помощью данной программы выполняется следующим образом:

1. В окне «Ввод данных» выполняется запись исходных данных зубчатого колеса (модуль зубчатого колеса – m_n , число зубьев колеса – Z_K , коэффициент смещения исходного контура – X , диаметр вершин зубьев – d_a , допуск на диаметр – IT, наименьшее дополнительное смещение исходного контура – E_{HS} , допуск на смещение исходного контура – T_H , ширина зуба – h_z), в соответствии с технической документацией детали (рисунок 2.14).

Ввод данных			
Модуль колеса	<input type="text"/>	Ширина венца	<input type="text"/>
Число зубьев	<input type="text"/>	Козф. коррекции	<input type="text"/>
Диаметр вершин	<input type="text"/>	Допуск на диаметр	<input type="text"/>
Смещение исх. конт.	<input type="text"/>	Допуск на смещение	<input type="text"/>

Рисунок 2.14 – Окно ввода исходных данных зубчатого колеса

2. В соответствии с выбранной стратегией измерений и набором контролируемых геометрических параметров колеса, определяется вид распределения положений контролируемых боковых поверхностей детали (n_r и n_h).

3. Нажатие кнопки «Расчет номинальных координат контакта» выводит на экран специальные диалоговые окна (рисунок 2.15), в поле которых заполняется следующая информация, для формирования массива точек: количество контролируемых впадин колеса, их порядковые номера, количество уровней и точек контроля на каждом из уровней сетки контроля.

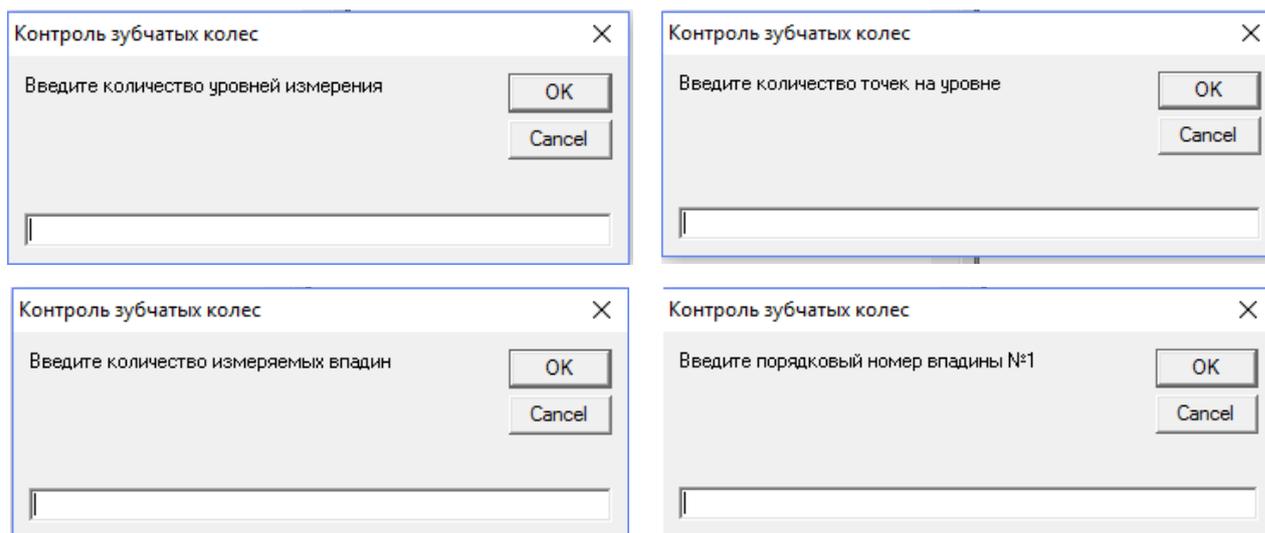


Рисунок 2.15 – Диалоговые окна программы для ввода измерительной информации для формирования сетки контроля

4. После ввода необходимой измерительной информации производится расчет массива точек контроля с выводом в специальном окне программы значений их координат.

По окончании расчетов, программа предлагает выполнить сохранение полученных результатов в корневой папке. Нажатием кнопки «Да» происходит формирование текстовых файлов: «Расчетные координаты контакта.txt» с XYZ-координатами контрольных точек и векторами нормали; «Исходные данные.txt» с исходными данными зубчатого колеса (рисунки 2.16 и 2.17 соответственно).

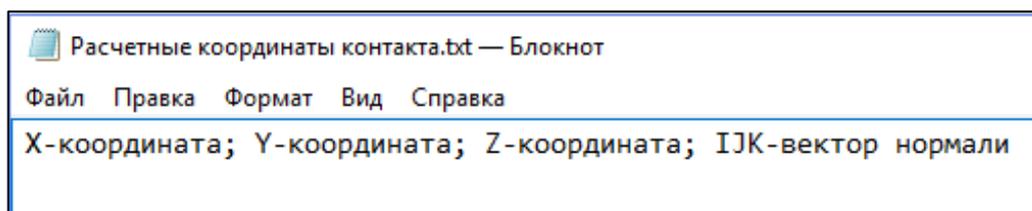


Рисунок 2.16 – Структура и содержание файла «Расчетные координаты контакта»

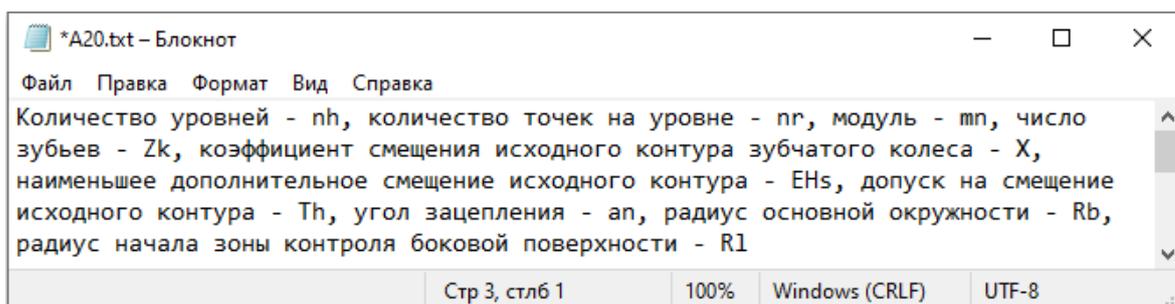


Рисунок 2.17 – Структура и содержание файла «Исходные данные.txt»

На основе вышеуказанных математических зависимостей был выполнен расчет координат точек контрольных сеток боковых поверхностей на примере двух зубчатых колес (рисунки 2.18 и 2.19 соответственно).

Результаты расчета для зубчатых колес №1 и №2 приведены на рисунках 2.20, 2.21 и 2.22, 2.23 соответственно.



Рисунок 2.18 – Зубчатое колесо №1

$m_n - 2$ мм; $Z - 30$; $X - 0$; $d_a - 64$ мм; $IT - h11$; $E_{Hs} - (-0,14)$ мм; $T_H - 0,14$ мм; $h_3 - 10$ мм



Рисунок 2.19 – Зубчатое колесо №2

$m_n - 3$ мм; $Z - 34$; $X - 0$; $d_a - 108$ мм; $\Gamma - h10$; $E_{Hs} - (-0,06)$ мм; $T_H - 0,08$ мм; $h_3 - 6$ мм

Расчетные координаты контакта.txt — Блокнот					
Файл	Правка	Формат	Вид	Справка	
30.229	8.876	1.500	0.680	-0.733	0
31.226	4.187	1.500	0.324	0.946	0
27.723	14.967	1.500	0.818	-0.575	0
29.673	10.588	1.500	0.120	0.993	0
24.006	20.403	1.500	0.920	-0.393	0
26.823	16.526	1.500	-0.089	0.996	0
19.239	24.949	1.500	0.981	-0.193	0
22.801	21.741	1.500	-0.294	0.956	0
13.631	28.403	1.500	1.000	0.015	0
17.782	26.007	1.500	-0.487	0.874	0
29.665	8.381	1.500	0.638	-0.770	0
30.509	4.410	1.500	0.270	0.963	0
27.275	14.365	1.500	0.784	-0.621	0
28.926	10.657	1.500	0.063	0.998	0
23.692	19.722	1.500	0.896	-0.444	0
26.078	16.438	1.500	-0.145	0.989	0
19.074	24.217	1.500	0.969	-0.248	0
22.090	21.501	1.500	-0.348	0.938	0
13.622	27.653	1.500	0.999	-0.041	0
17.138	25.624	1.500	-0.535	0.845	0
29.086	7.930	1.500	0.588	-0.809	0
29.797	4.586	1.500	0.208	0.978	0

Рисунок 2.20 – Фрагмент расчета массива координат точек контроля для зубчатого колеса №1

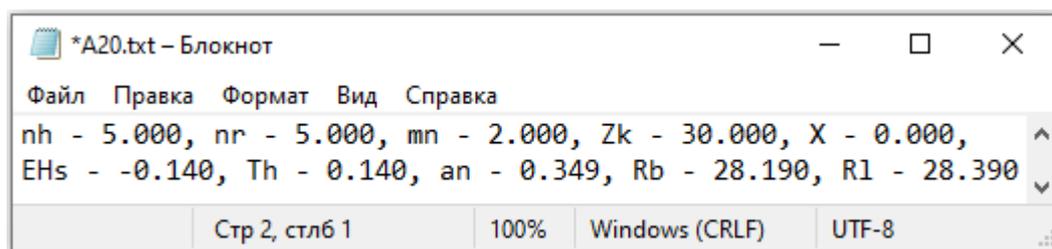


Рисунок 2.21 – Формирование файла с исходными данными зубчатого колеса №1

Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
53.141	3.478	0.900	0.494	-0.869 0
53.141	-3.478	0.900	0.494	0.869 0
51.597	13.184	0.900	0.645	-0.764 0
52.876	6.346	0.900	0.326	0.945 0
48.296	22.440	0.900	0.775	-0.632 0
50.809	15.954	0.900	0.146	0.989 0
43.351	30.932	0.900	0.878	-0.479 0
47.013	25.018	0.900	-0.038	0.999 0
36.929	38.371	0.900	0.951	-0.310 0
41.615	33.231	0.900	-0.221	0.975 0
52.060	2.903	0.900	0.445	-0.896 0
52.060	-2.903	0.900	0.445	0.896 0
50.640	12.419	0.900	0.602	-0.799 0
51.707	6.713	0.900	0.272	0.962 0
47.496	21.513	0.900	0.738	-0.675 0
49.593	16.100	0.900	0.091	0.996 0
42.734	29.874	0.900	0.849	-0.528 0
45.791	24.938	0.900	-0.094	0.996 0
36.518	37.218	0.900	0.932	-0.363 0
40.428	32.928	0.900	-0.275	0.961 0
50.971	2.403	0.900	0.387	-0.922 0
50.971	-2.403	0.900	0.387	0.922 0

Рисунок 2.22 – Фрагмент расчета массива координат точек контроля для зубчатого колеса №2

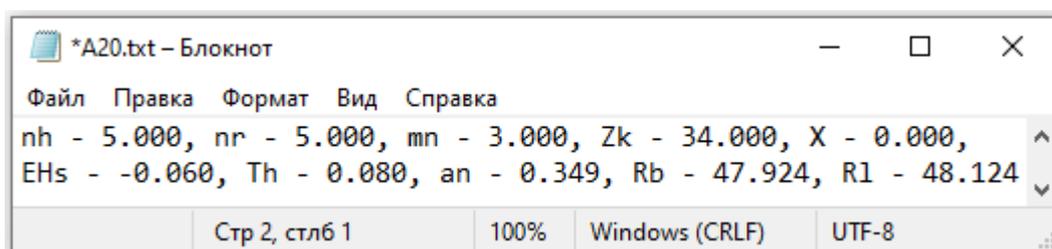


Рисунок 2.23 – Формирование файла с исходными данными зубчатого колеса №2

Указанные выше результаты исследований являются логическим обоснованием достоверности принятых решений, которые требуют экспериментального подтверждения.

2.3 Выводы по главе 2

1. На основании геометрического представления искажений формы боковой поверхности зубьев было определено, что ее форма совместно с искажениями представляет поверхность второго порядка, для установления которой необходимо 17 измерений в разных точках поверхности.

2. Рекомендации статистических методов управления качеством продукции позволили установить оптимальные размеры сеток в зависимости от размера зубьев в пределах $5 \times 5 \dots 7 \times 10$ точек контроля.

3. Точки контроля боковых поверхностей зубчатых колес располагаются в виде координатной сетки в регулярной форме (с постоянными шагами).

4. На основе разработанного инструментария, включающего в себя методики выполнения следующих видов работ: определение числа и координат контрольных точек при контроле боковой поверхности зуба, определение минимально необходимого числа боковых поверхностей зубьев, требуемых для измерений и обеспечивающих контроль требуемых показателей качества зубчатого колеса, порядок формирования программы проведения замеров на КИМ, обработка результатов измерений, было разработано ПО для расчета координат точек контрольных сеток боковых поверхностей зубчатых колес и оценки параметров качества данных деталей.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОСТАВЛЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

На основании проведенного выше анализа установлено оптимальное количество контрольных точек, необходимых для оценки показателей качества зубчатого колеса. Для практического проведения измерений необходимо связать полученные результаты с возможностью средства контроля – КИМ [32, 33, 34]. Это требует согласования возможностей ПО КИМ с результатами расчетов координат контрольных точек.

При разработке методического обеспечения процесса проведения координатного контроля оценке качества изготовления прямозубых зубчатых колес автором разработан комплект методических инструкций: методическая инструкция МИ 01-24 «Алгоритм расчета координат контрольных точек боковой поверхности зубчатого колеса»; методическая инструкция МИ 02-24 «Алгоритм проверки расположения расчетных координат контрольных точек на боковой поверхности зубчатого колеса»; методика выполнения измерений МВИ 03-24 «Оценка показателей качества зубчатых колес с применением универсальных координатно-измерительных машин»; методическая инструкция МИ 04-24 «Алгоритм обработки массива координат измеренных точек боковой поверхности зубчатого колеса»; методическая инструкция МИ 05-24 «Алгоритм оценки результатов измерений зубчатого колеса».

Комплект методических инструкций был утвержден и принят в работу АО «АК «Туламашзавод»» (г. Тула) и АО «Тулаточмаш» (г. Тула).

3.1 Методика контроля расположения расчетных координат контрольных точек на боковой поверхности зубчатого колеса

Представленные в виде числового файла координаты контрольных точек могут содержать погрешности, которые приводят к отрицательным результатам изме-

рений. Поэтому перед непосредственным составлением управляющей измерительной программы на КИМ, параметры контрольных точек подвергаются проверке на правильность расположения. Согласно требованиям МИ 01-24, проверка расположения контролируемых точек на боковой поверхности зубчатого колеса – обязательная и неотъемлемая процедура выполнения измерений. В основе данной процедуры лежит процесс объединения сформированного массива координат точек контроля с трехмерной моделью зубчатого колеса.

В настоящее время наиболее рационально выполнять разработку 3D-модели измеряемой детали внутри системы автоматизированного проектирования «КОМПАС-3D», как одной из наиболее доступной и простой для пользователя.

Для построения модели необходимо воспользоваться специальным модулем «Валы и механические передачи 3D» (рисунок 3.1).

Создание трехмерной модели зубчатого колеса выполняется на основе известных исходных данных детали, указанных в технической документации. В соответствующих блоках модуля «Валы и механические передачи 3D», внутри системы «КОМПАС-3D» вводится следующая информация: модуль (m_n); число зубьев (z); ширина зубчатого венца (b); коэффициент смещения исходного контура зубчатого колеса (χ); степень точности по ГОСТ 1643-81. При корректном вводе данных строит трехмерную модель зубчатого колеса.

Так для параметров: $m_n = 2,5$ мм; $Z_K = 30$; $h_3 = 13$ мм; $\chi = -0,25$; $E_{H_S} - (-0,09)$ мм; $T_H - 0,12$ мм построенная модель, представленная на рисунке 3.3.

Согласно программно-вычислительного комплекса контроля геометрических параметров зубчатых колес, приведенного в главе 2 для параметров контрольной сетки с $n_r = 6$ и $n_h = 5$ были рассчитаны параметры контрольных точек векторов нормалей, которые были сведены в файл «Расчетные координаты контакта.txt» (рисунок 3.2).

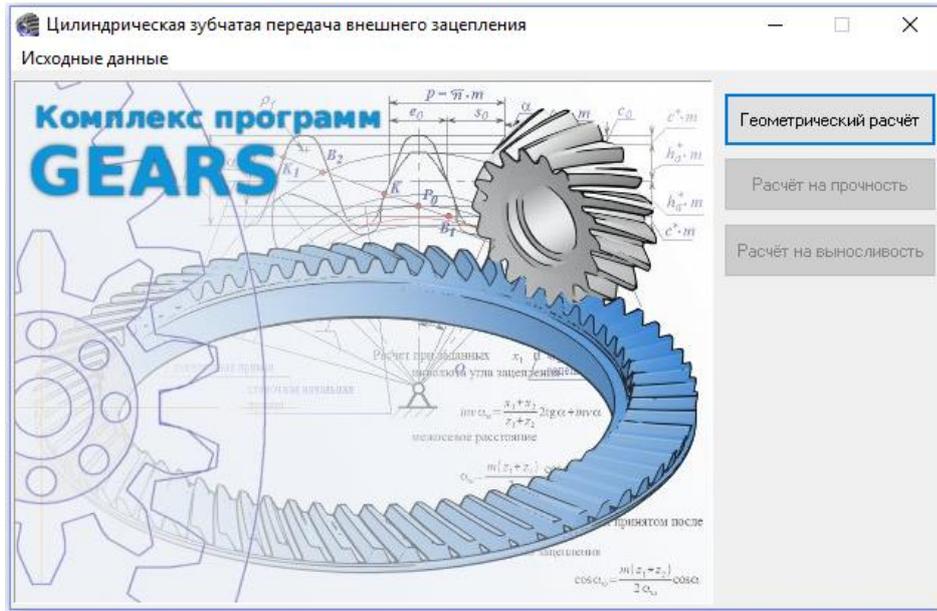


Рисунок 3.1 – Модуль «Валы и механические передачи 3D»

Процесс объединения массива координат точек контроля с разработанной моделью выполняется следующим образом:

1. На панели инструментов системы «КОМПАС-3D» во вкладке «Пространственные кривые» необходимо воспользоваться функцией «Группа точек из файла».
2. Во всплывающем диалоговом окне указывается путь к файлу с расчетными данными.
3. Средствами программы выполняется процесс объединения импортированного массива координат точек контроля и трехмерной модели детали (рисунок 3.3).

Оценка правильного расположения точек контроля производится визуально при повороте модели. По результатам проведенной проверки принимается решение о продолжении или приостановке проведения измерений. В случае отрицательных результатов проверки, выясняются причины их появления, проверяется правильность ввода значений исходных данных при формировании массива контрольных точек и создании трехмерной модели детали, вносятся необходимые корректировки. По завершении корректирующих действий процедура проверки выполняется повторно.

Расчетные координаты контакта.txt — Блокнот						
Файл	Правка	Формат	Вид	Справка		
38.610	2.816	1.950	0.479	-0.878	0	
38.610	-2.816	1.950	0.479	0.878	0	
29.581	24.972	1.950	0.904	-0.428	0	
32.891	20.416	1.950	-0.128	0.992	0	
23.742	30.577	1.950	0.973	-0.231	0	
27.928	26.809	1.950	-0.332	0.943	0	
-21.744	32.029	1.950	0.521	0.854	0	
-16.866	34.845	1.950	-1.000	-0.024	0	
-36.417	13.132	1.950	-0.081	0.997	0	
-34.127	18.277	1.950	-0.795	-0.607	0	
-38.352	5.273	1.950	-0.286	0.958	0	
-37.181	10.782	1.950	-0.651	-0.759	0	
-16.866	-34.845	1.950	-1.000	0.024	0	
-21.744	-32.029	1.950	0.521	-0.854	0	
6.836	-38.104	1.950	-0.823	-0.568	0	
1.235	-38.693	1.950	0.923	-0.385	0	
14.609	-35.850	1.950	-0.687	-0.727	0	
9.253	-37.590	1.950	0.983	-0.184	0	
37.936	2.469	1.950	0.435	-0.901	0	
37.936	-2.469	1.950	0.435	0.901	0	
29.239	24.295	1.950	0.881	-0.473	0	
32.142	20.301	1.950	-0.178	0.984	0	
23.549	29.844	1.950	0.960	-0.280	0	
27.219	26.540	1.950	-0.378	0.926	0	
-21.106	31.619	1.950	0.563	0.827	0	
-16.830	34.088	1.950	-0.997	-0.074	0	
-35.660	13.174	1.950	-0.031	1.000	0	
-33.652	17.685	1.950	-0.763	-0.646	0	

Рисунок 3.2 – Фрагмент массива точек контрольных сеток боковых поверхностей зубчатого колеса файл «Расчетные координаты контакта.txt»

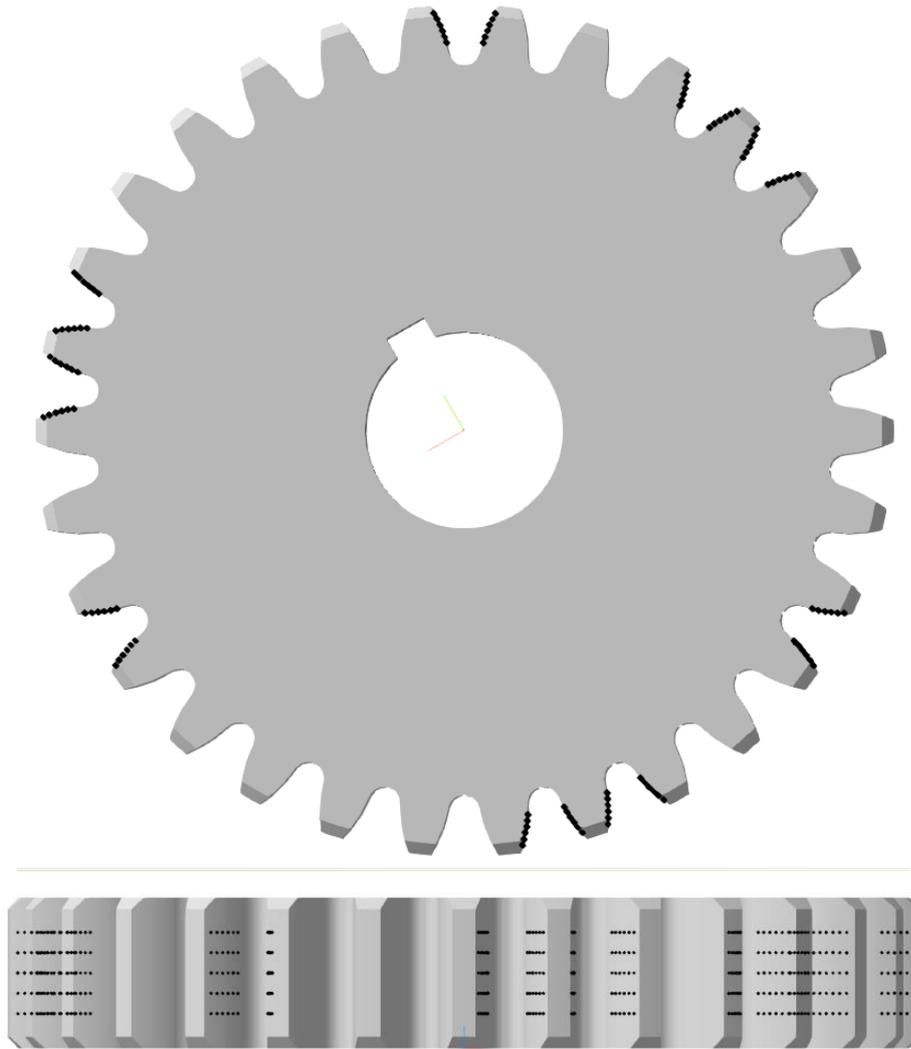


Рисунок 3.3 – Результат процесса объединения массива координат контрольных точек с трехмерной моделью измеряемого зубчатого колеса

3.2 Разработка методики проведения измерений

При положительных результатах проверки положения расчетных точек контрольной сетки на боковых поверхностях зубьев дальнейшие действия по проведению измерений выполняются по следующему алгоритму:

1. КИМ подготавливают к работе согласно требованиям, приведенным в руководстве по эксплуатации [86].
2. Определяется диаметр измерительного наконечника, длина его удлинителя в соответствии с модулем и шириной контролируемого зубчатого колеса.

3. Выполняется калибровка измерительного наконечника КИМ, согласно руководству по эксплуатации.

4. Зубчатое колесо располагают на рабочем столе КИМ таким образом, чтобы одна из торцовых поверхностей была параллельна его плоскости, ось Y проходила через центр одной из впадин между зубьями (рисунок 3.4).

5. От смещения колесо фиксируется на столе техническим пластилином.

6. Включается режим записи измерительной программы.

7. Устанавливаются параметры ЧПУ (величина дистанции отхода, подхода и поиска поверхности детали) для исключения самопроизвольного попадания щупа на неконтролируемые участки детали.



Рисунок 3.4 – Рекомендуемое расположение контролируемого зубчатого колеса на измерительном столе КИМ

Подготовка к измерениям на данном этапе завершается, осуществляется переход к непосредственно самому процессу контроля зубчатых колес. Дальнейшие действия выполняются в соответствии с МВИ 03-24.

Измеряются «базовые» элементы зубчатого колеса:

1. Проводится определение положения верхней плоскости детали путем измерения координат не менее чем в 3-х точках (точки 1...4 на рисунке 3.5).
2. Проводится определение положения посадочного отверстия в 2-х или более сечениях 4 и более точек в сечении (точки 5...12 на рисунке 3.5).

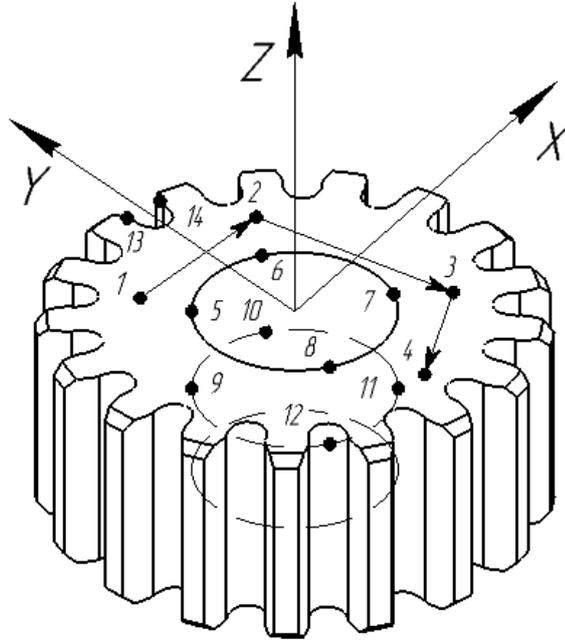


Рисунок 3.5 – Порядок измерений зубчатого колеса

3. Проводится определение положения центра одной из впадин колеса, принятой за базовую, путем зондирования 2-х точек, лежащих примерно на ее противоположных сторонах на одном радиусе (рисунок 3.6).

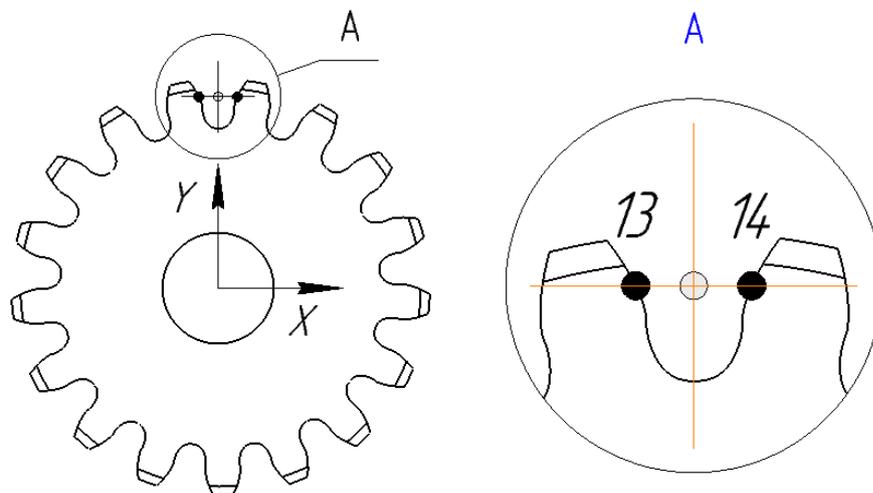


Рисунок 3.6 – Последовательность измерений «базовых» элементов зубчатого колеса, используемых для создания системы координат

4. По измеренным «базовым» элементам зубчатого колеса, формируется локальная система координат. Направление оси Z задается по верхней плоскости, направление оси Y по медиане (средней точке) впадины [63].

5. В базовое ПО КИМ импортируется файл данных, содержащий массив контролируемых точек «Расчетные координаты контакта.txt»).

6. Измерительный наконечник перемещается в опорную точку, соответствующую центру начальной контрольной впадины k_1 (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Положение измерительного наконечника КИМ перед измерением первой впадины зубчатого колеса

7. В автоматическом режиме выполняется измерение по всем точкам правой и левой сторон первого сечения в соответствии с их порядковым номером. По окончании контроля первого уровня точек щуп производит последовательно зондирование на следующем уровне. Процесс повторяется до завершения зондирования всей впадины.

8. Измерительный наконечник в ручном режиме перемещается в положение следующей опорной точки, соответствующей центру контрольной впадины k_2 (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Перемещение измерительного наконечника КИМ в опорную точку контрольной впадины K_2

9. Контроль повторяется аналогичным образом по всем впадинам зубьев, по которым необходимо провести измерения (рисунки 3.9 и 3.10).

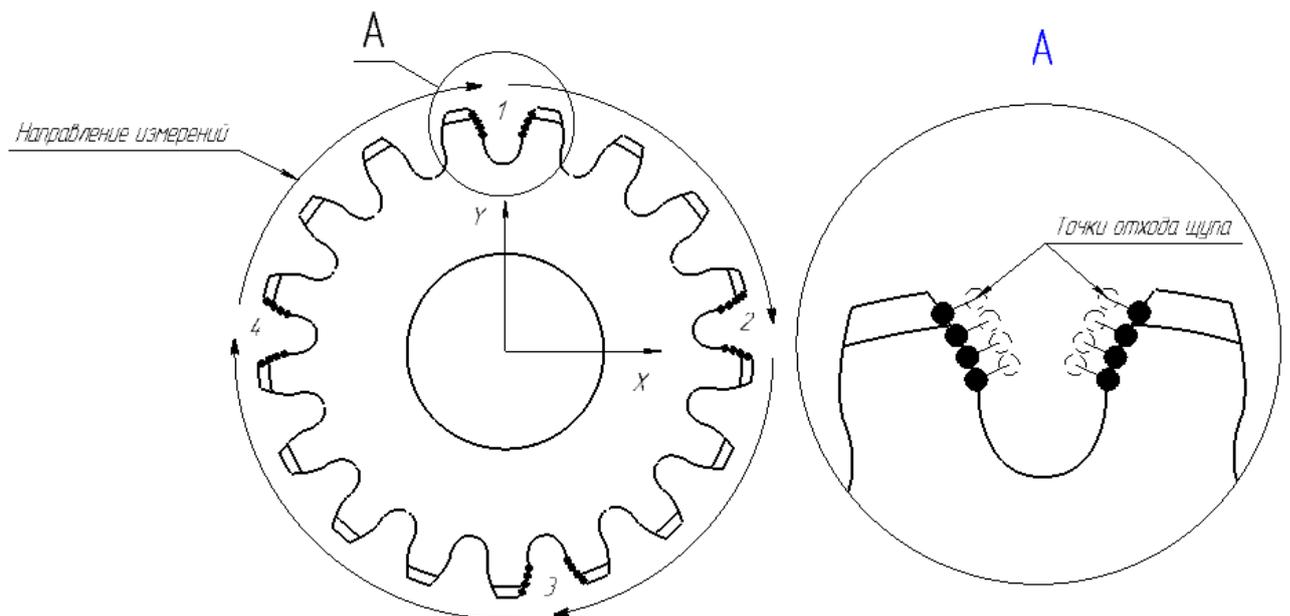


Рисунок 3.9 – Схема измерений боковых поверхностей зубчатого колеса



Рисунок 3.10 – Процесс измерения зубчатого колеса

10. По окончании измерений, формируется файл данных «Результаты измерений.txt», содержащий координаты проконтролированных точек X_{ijk} , Y_{ijk} , Z_{ijk} , их порядковые номера и векторы нормали I , J , K (содержание файла представлено на рисунке 3.11).

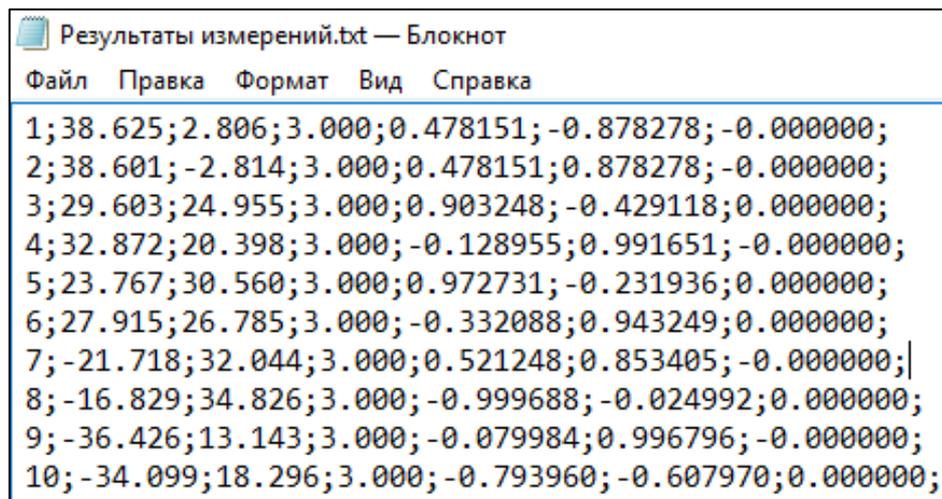
11. Полученная измерительная программа записывается в отдельный файл в памяти КИМ.

12. При контроле одинаковых изделий возможно повторение измерений по сформированной измерительной программе в автоматическом режиме.

13. При необходимости проведения многократных измерений файл с расчетными координатами контрольных точек повторно импортируется в ПО КИМ и процесс измерений повторяется с записью результатов измерений в новый числовой файл.

3.3 Методика обработки массива координат измеренных точек боковой поверхности зубчатого колеса, представленных ПО КИМ в форму, необходимую для представления в программу оценки результатов измерений

Полученные результаты измерений в форме, определяемой ПО КИМ (рисунок 3.11), могут быть индивидуальны для каждой КИМ и не соответствовать требованиям унифицированной программы обработки результатов измерений. Поэтому для оценки результатов измерений и их преобразования в нормативную форму необходимо провести предварительную обработку с удалением текстовых пояснений и синтаксиса [6, 91]. При проведении многократных измерений также рекомендуется предварительное преобразование файлов результатов измерений в упрощенную форму.



```

Результаты измерений.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
1;38.625;2.806;3.000;0.478151;-0.878278;-0.000000;
2;38.601;-2.814;3.000;0.478151;0.878278;-0.000000;
3;29.603;24.955;3.000;0.903248;-0.429118;0.000000;
4;32.872;20.398;3.000;-0.128955;0.991651;-0.000000;
5;23.767;30.560;3.000;0.972731;-0.231936;0.000000;
6;27.915;26.785;3.000;-0.332088;0.943249;0.000000;
7;-21.718;32.044;3.000;0.521248;0.853405;-0.000000;
8;-16.829;34.826;3.000;-0.999688;-0.024992;0.000000;
9;-36.426;13.143;3.000;-0.079984;0.996796;-0.000000;
10;-34.099;18.296;3.000;-0.793960;-0.607970;0.000000;

```

Рисунок 3.11 – Фрагмент массива координат результатов измерений контрольных точек в локальной системе координат, выдаваемый ПО КИМ

Распределение по столбцам: 1 – номера точек; 2 – координата Y; 3 – координата X; 4 – координата Z; 5, 6, 7 – проекции вектора нормали по координатным осям

Процесс обработки координат измеренных точек контакта выполняется в соответствии с методической инструкцией МИ 04-24:

1. Нажатие кнопки «Расчет средних значений координат контакта» выводит на экран специальные диалоговые окна, в поле которых заполняется следующая

информация: количество измеренных впадин колеса, количество выполненных серий измерений в одной рабочей сессии (рисунок 3.12)

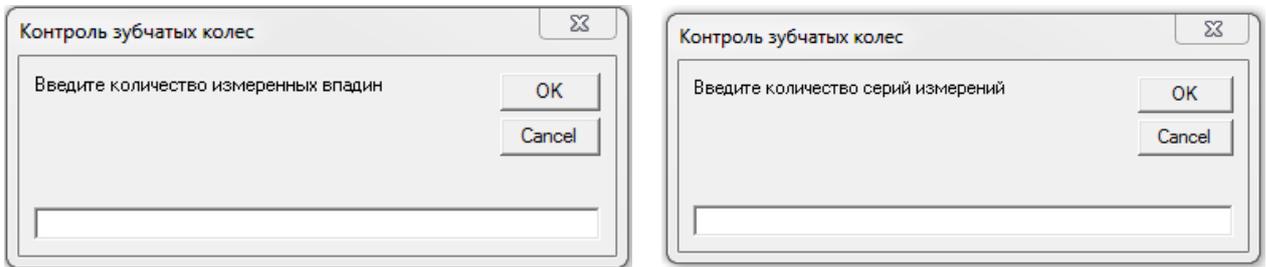


Рисунок 3.12 – Диалоговые окна ввода информации о проведенных измерениях зубчатого колеса

2. В файле «Результаты измерений.txt» выполняется поиск и замена лишнего для дальнейшей обработки синтаксиса (рисунок 3.13) с помощью специального блока разработанной программы в системе программирования Visual Basic.

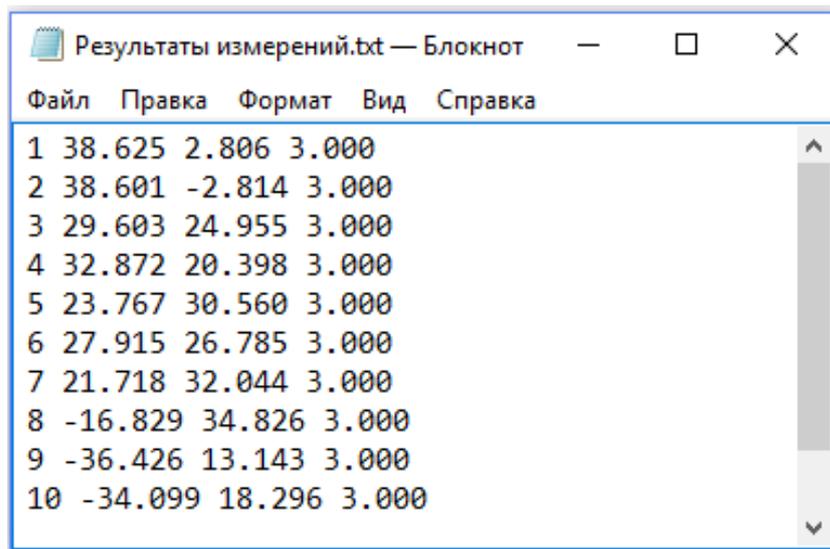


Рисунок 3.13 – Отформатированный файл данных, содержащий координаты точек контроля

3. Отформатированный файл «Результаты измерений.txt» подвергается дальнейшей обработке, в частности с помощью специального блока разработанной

программы выполняется расчет средних значений измеренных координат точек контакта при многократных измерениях.

4. В случае проведения однократного измерения, шаг № 2 пропускается.

5. Выполняется сортировка измеренных точек на две группы: для левой и правой стороны впадины с отображением в специальном блоке программы (рисунок 3.14) с помощью специального блока разработанной программы.

Координаты измеренных точек			
Левая сторона			
X-координата	Y-координата	Z-координата	
Правая сторона			
X-координата	Y-координата	Z-координата	
			№ X-координата Y-координата Z-координата

Рисунок 3.14 – Структура и содержание результата обработки файла с координатами точек контроля

6. Предварительная обработка файла данных «Результаты измерений.txt» завершается, выполняется замена исходного файла на отформатированный.

Для оценки достоверности получаемых результатов измерений была выполнена проверка их повторяемости, для чего были выполнены повторные серии измерений зубчатого колеса.

Так, для оценки повторяемости результатов измерений были проведены повторные измерения зубчатого колеса по одним и тем же контрольным точкам (ри-

сунок 3.4) (в объеме пяти серий) по сформированной при первом измерении измерительной программе. Контроль зубчатого колеса проводился по аналогичным боковым поверхностям, в количестве 9 впадин с сеткой контроля размером 5x5 точек, что суммарно составило 450 точек контроля. Результаты измерений представлены в таблице 3.1 и содержат данные по ограниченному числу координат 11 точек контроля, расположенных в различных секторах колеса.

Таблица 3.1 – Результаты многократных измерений некоторых точек контроля боковой поверхности зубчатого колеса

Номер точки	Координата X	Координата Y	Координата Z
1 серия измерений			
1	38,625	2,806	3,000
50	-20,746	-31,342	3,000
100	-32,074	16,215	3,000
150	26,817	26,341	4,750
200	35,898	-1,735	4,750
250	1,459	-38,103	6,500
300	-35,246	9,448	6,500
350	-16,800	34,229	8,250
400	30,570	19,892	8,250
450	9,249	-37,575	10,000
2 серия измерений			
1	38,624	2,806	3,000
50	-20,748	-31,342	3,000
100	-32,074	16,216	3,000
150	26,815	26,343	4,750
200	35,900	-1,735	4,750
250	1,459	-38,105	6,500
300	-35,248	9,450	6,500
350	-16,802	34,229	8,250
400	30,573	19,890	8,250
450	9,250	-37,576	10,000
3 серия измерений			
1	38,624	2,807	3,000
50	-20,745	-31,341	3,000
100	-32,074	16,214	3,000
150	26,815	26,341	4,750
200	35,898	-1,734	4,750
250	1,458	-38,104	6,500
300	-35,248	9,448	6,500

Номер точки	Координата X	Координата Y	Координата Z
350	-16,802	34,227	8,250
400	30,570	19,893	8,250
450	9,249	-37,576	10,000
4 серия измерений			
1	38,626	2,808	3,000
50	-20,746	-31,341	3,000
100	-32,072	16,216	3,000
150	26,815	26,343	4,750
200	35,898	-1,733	4,750
250	1,458	-38,105	6,500
300	-35,248	9,448	6,500
350	-16,800	34,229	8,250
400	30,572	19,892	8,250
450	9,250	-37,575	10,000
5 серия измерений			
1	38,624	2,806	3,000
50	-20,746	-31,341	3,000
100	-32,074	16,215	3,000
150	26,816	26,340	4,750
200	35,899	-1,737	4,750
250	1,460	-38,105	6,500
300	-35,245	9,448	6,500
350	-16,801	34,229	8,250
400	30,571	19,893	8,250
450	9,248	-37,575	10,000

В основе контроля повторяемости лежит сравнение полученных расхождений между результатами измерений по абсолютной величине с пределом повторяемости $r_{X(Y)}$.

$$S_{max_{X(Y)}} - S_{min_{X(Y)}} \leq r_{X(Y)}, \quad (3.1)$$

где $S_{max_{X(Y)}}$ и $S_{min_{X(Y)}}$ – максимальное и минимальное значение параметров одной и той же контрольной точки по результатам измерений.

Если неравенство (3.1) выполняется, то все результаты в серии считаются приемлемыми и за результат измерений принимается среднее значение \bar{X} , вычисленное по формуле:

$$\bar{S}_{X(Y)} = \frac{S_{1X(Y)} + S_{2X(Y)} + \dots + S_{nX(Y)}}{n}, \quad (3.2)$$

где n – количество измерений.

На основе данных, приведенных в таблице 3.1 производится расчет предела повторяемости $r_{X(Y)}$ для X, Y координат точек контроля:

$$r_{X(Y)} = f(n) \cdot \sigma_{X(Y)}, \quad (3.3)$$

где n – количество измерений;

$\sigma_{X(Y)}$ – среднеквадратическое отклонение результатов измерений:

$$\sigma_{X(Y)} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (S_{iX(Y)} - \bar{S}_{X(Y)})^2}{n}}; \quad (3.4)$$

$f(n)$ – коэффициент измерений.

Таблица 3.2 – Расчет предела повторяемости $r_{X(Y)}$ результатов измерений зубчатого колеса

Номер точки	Координата X	Координата Y
1	0,003	0,003
50	0,004	0,002
100	0,003	0,003
150	0,003	0,005
200	0,003	0,005
250	0,003	0,003
300	0,005	0,003
350	0,003	0,003
400	0,005	0,004
450	0,003	0,002

На основании проведенного расчета можно утверждать, что расхождение между результатами измерений не превышают удвоенной погрешности контроля линейных параметров на КИМ (погрешность контроля равна 0,03 мм) и результаты контроля можно признать достоверными.

Это позволяет предположить, что при многократных измерениях результат контроля можно рассматривать как среднеарифметическое значение со снижением погрешности результатов измерений (1.7).

Для дополнительной оценки достоверности результатов измерений, получаемых на КИМ производилась проверка их повторяемости на основе данных, полученных при контроле от различных базовых боковых поверхностей колеса (рисунок 3.15).

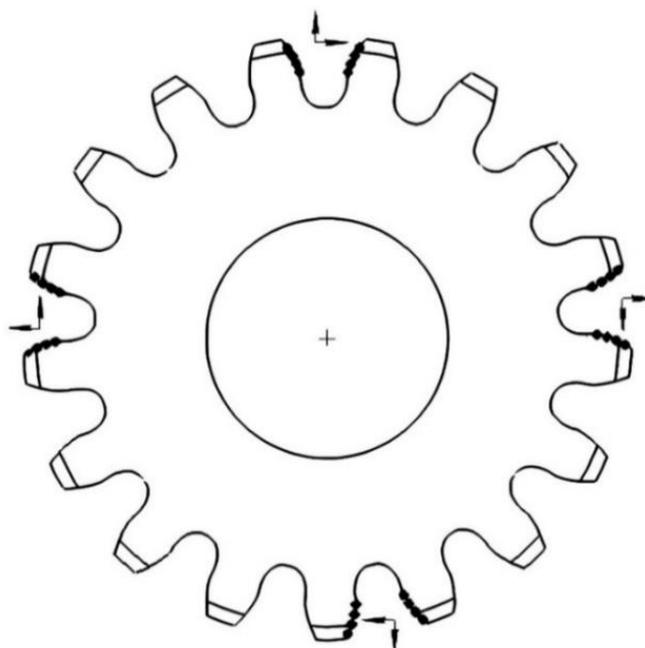


Рисунок 3.15 – Варианты формирования системы координат на различных боковых поверхностях колеса

Так, по аналогичной схеме измерений и измерительной программе КИМ было проконтролировано тоже зубчатое колесо, что и в предыдущем эксперименте, но с заданной от другой впадины системой координат, что предполагает измерения других боковых поверхностей колеса. Результаты измерений представлены в таблице 3.3 и содержат данные по ограниченному числу координат 11 точек контроля, расположенных в различных секторах колеса.

Таблица 3.3 – Результаты многократных измерений некоторых точек контроля боковой поверхности зубчатого колеса от новой системы координат

Номер точки	Координата X , мм	Координата Y , мм	Координата Z , мм
1 серия измерений			

Номер точки	Координата X, мм	Координата Y, мм	Координата Z, мм
1	38,624	2,805	3,000
50	-20,748	-31,343	3,000
100	-32,072	16,216	3,000
150	26,816	26,342	4,750
200	35,897	-1,734	4,750
250	1,460	-38,102	6,500
300	-35,245	9,449	6,500
350	-16,801	34,230	8,250
400	30,571	19,890	8,250
450	9,257	-37,573	10,000
2 серия измерений			
1	38,625	2,806	3,000
50	-20,746	-31,342	3,000
100	-32,074	16,215	3,000
150	26,815	26,343	4,750
200	35,898	-1,734	4,750
250	1,461	-38,102	6,500
300	-35,244	9,449	6,500
350	-16,802	34,232	8,250
400	30,574	19,892	8,250
450	9,259	-37,573	10,000
3 серия измерений			
1	38,623	2,807	3,000
50	-20,748	-31,343	3,000
100	-32,070	16,214	3,000
150	26,815	26,342	4,750
200	35,897	-1,733	4,750
250	1,461	-38,102	6,500
300	-35,245	9,449	6,500
350	-16,800	34,230	8,250
400	30,571	19,890	8,250
450	9,255	-37,573	10,000
4 серия измерений			
1	38,624	2,806	3,000
50	-20,748	-31,343	3,000
100	-32,070	16,215	3,000
150	26,816	26,342	4,750
200	35,897	-1,734	4,750
250	1,461	-38,102	6,500
300	-35,245	9,450	6,500
350	-16,800	34,231	8,250
400	30,571	19,891	8,250
450	9,257	-37,574	10,000

Номер точки	Координата X, мм	Координата Y, мм	Координата Z, мм
5 серия измерений			
1	38,625	2,805	3,000
50	-20,746	-31,343	3,000
100	-32,072	16,216	3,000
150	26,816	26,342	4,750
200	35,896	-1,734	4,750
250	1,462	-38,103	6,500
300	-35,245	9,448	6,500
350	-16,802	34,230	8,250
400	30,570	19,890	8,250
450	9,256	-37,573	10,000

В соответствии с полученными данными был произведен расчет предела повторяемости $r_{X(Y)}$ результатов измерений для данного эксперимента.

Таблица 3.4 – Расчет предела повторяемости $r_{X(Y)}$ результатов измерений зубчатого колеса от новой системы координат

Номер точки	r_X	r_Y
1	0,003	0,003
50	0,004	0,002
100	0,006	0,003
150	0,002	0,002
200	0,003	0,002
250	0,003	0,002
300	0,002	0,003
350	0,004	0,003
400	0,006	0,003
450	0,006	0,002

Определение достоверности результатов измерений точек контрольных сеток боковых поверхностей зубчатого колеса выполняется аналогичным образом на примере еще двух зубчатых колес (рисунки 2.17 и 2.18 соответственно).

Контроль зубчатого колеса проводился по 9 впадинам с сеткой контроля размером 6х6 точек, что суммарно составило 648 точек контроля. Результаты измерений представлены в таблице 3.5 и содержат данные по ограниченному числу координат 15 точек контроля, расположенных в различных секторах колеса.

Таблица 3.5 – Результаты многократных измерений некоторых точек контроля боковой поверхности второго зубчатого колеса

Номер точки	Координата X, мм	Координата Y, мм	Координата Z, мм
1 серия измерений			
1	30,294	8,815	1,500
50	-16,712	-25,450	1,500
100	-25,816	12,747	1,500
150	21,638	21,419	2,900
200	28,377	4,862	2,900
250	1,224	-30,975	4,300
300	-28,402	7,371	4,300
350	-13,716	27,798	5,700
400	24,482	16,175	5,700
450	7,513	-30,642	7,100
500	-16,236	-25,102	7,100
550	-27,799	14,920	8,500
600	21,099	21,178	8,500
648	7,802	-27,714	8,500
2 серия измерений			
1	30,297	8,814	1,500
50	-16,711	-25,451	1,500
100	-25,815	12,746	1,500
150	21,636	21,418	2,900
200	28,375	4,863	2,900
250	1,223	-30,974	4,300
300	-28,401	7,370	4,300
350	-13,715	27,798	5,700
400	24,483	16,174	5,700
450	7,513	-30,642	7,100
500	-16,235	-25,104	7,100
550	-27,800	14,920	8,500
600	21,099	21,178	8,500
648	7,802	-27,715	8,500
3 серия измерений			
1	30,294	8,814	1,500
50	-16,712	-25,450	1,500

Номер точки	Координата X, мм	Координата Y, мм	Координата Z, мм
100	-25,815	12,746	1,500
150	21,638	21,419	2,900
200	28,377	4,862	2,900
250	1,225	-30,974	4,300
300	-28,402	7,372	4,300
350	-13,714	27,798	5,700
400	24,482	16,174	5,700
450	7,513	-30,642	7,100
500	-16,235	-25,101	7,100
550	-27,798	14,920	8,500
600	21,099	21,178	8,500
648	7,802	-27,713	8,500
4 серия измерений			
1	30,293	8,813	1,500
50	-16,713	-25,450	1,500
100	-25,815	12,746	1,500
150	21,639	21,419	2,900
200	28,376	4,862	2,900
250	1,225	-30,974	4,300
300	-28,400	7,371	4,300
350	-13,716	27,798	5,700
400	24,482	16,174	5,700
450	7,513	-30,640	7,100
500	-16,235	-25,100	7,100
550	-27,799	14,922	8,500
600	21,099	21,176	8,500
648	7,802	-27,716	8,500
5 серия измерений			
1	30,295	8,814	1,500
50	-16,713	-25,450	1,500
100	-25,815	12,746	1,500
150	21,639	21,419	2,900
200	28,379	4,863	2,900
250	1,225	-30,974	4,300
300	-28,403	7,371	4,300
350	-13,716	27,797	5,700
400	24,483	16,174	5,700
450	7,514	-30,642	7,100
500	-16,235	-25,102	7,100
550	-27,797	14,921	8,500
600	21,097	21,178	8,500
648	7,800	-27,716	8,500

В соответствии с полученными данными был произведен расчет предела повторяемости $r_{X(Y)}$ результатов измерений для данного эксперимента.

Таблица 3.6 – Расчет предела повторяемости $r_{X(Y)}$ результатов измерений второго зубчатого колеса от новой системы координат

Номер точки	r_X	r_Y
1	0,006	0,003
50	0,003	0,002
100	0,002	0,002
150	0,005	0,002
200	0,006	0,002
250	0,003	0,002
300	0,004	0,003
350	0,003	0,002
400	0,002	0,002
450	0,002	0,003
500	0,002	0,006
550	0,004	0,003
600	0,003	0,003
648	0,003	0,005

Контроль зубчатого колеса проводился по 9 впадинам с сеткой контроля размером 7x7 точек, что суммарно составило 882 точки контроля. Результаты измерений представлены в таблице 3.7 и содержат данные по ограниченному числу координат 19 точек контроля, расположенных в различных секторах колеса.

Таблица 3.7 – Результаты многократных измерений некоторых точек контроля боковой поверхности третьего зубчатого колеса

Номер точки	Координата X, мм	Координата Y, мм	Координата Z, мм
1 серия измерений			
1	53,164	3,434	0,900
50	-45,379	-24,945	0,900
100	-35,363	34,701	0,900
150	40,803	33,082	1,600
200	50,249	-2,066	1,600
250	23,193	-42,935	1,600

Номер точки	Координата X, мм	Координата Y, мм	Координата Z, мм
300	-42,557	29,502	2,300
350	-11,799	48,120	2,300
400	46,187	25,022	3,000
450	-16,217	-48,392	3,000
500	-42,322	-24,295	3,000
550	-36,411	36,820	3,700
600	37,816	32,011	3,700
650	52,441	-3,040	4,400
700	-24,832	-44,589	4,400
750	-40,612	27,056	4,400
800	-11,575	50,473	5,100
850	43,054	24,517	5,100
882	-14,909	-46,466	5,100
2 серия измерений			
1	53,163	3,434	0,900
50	-45,378	-24,945	0,900
100	-35,364	34,701	0,900
150	40,804	33,084	1,600
200	50,248	-2,066	1,600
250	23,192	-42,935	1,600
300	-42,557	29,502	2,300
350	-11,799	48,120	2,300
400	46,187	25,022	3,000
450	-16,217	-48,392	3,000
500	-42,322	-24,295	3,000
550	-36,411	36,820	3,700
600	37,816	32,011	3,700
650	52,441	-3,040	4,400
700	-24,832	-44,587	4,400
750	-40,612	27,054	4,400
800	-11,575	50,474	5,100
850	43,054	24,516	5,100
882	-14,909	-46,465	5,100
3 серия измерений			
1	53,164	3,434	0,900
50	-45,379	-24,945	0,900
100	-35,363	34,701	0,900
150	40,803	33,083	1,600
200	50,249	-2,066	1,600
250	23,192	-42,936	1,600
300	-42,556	29,501	2,300
350	-11,797	48,121	2,300
400	46,185	25,023	3,000

Номер точки	Координата X, мм	Координата Y, мм	Координата Z, мм
450	-16,216	-48,393	3,000
500	-42,322	-24,295	3,000
550	-36,411	36,820	3,700
600	37,816	32,011	3,700
650	52,441	-3,040	4,400
700	-24,832	-44,589	4,400
750	-40,612	27,056	4,400
800	-11,575	50,473	5,100
850	43,054	24,517	5,100
882	-14,909	-46,466	5,100
4 серия измерений			
1	53,164	3,434	0,900
50	-45,379	-24,945	0,900
100	-35,363	34,701	0,900
150	40,803	33,082	1,600
200	50,249	-2,064	1,600
250	23,193	-42,935	1,600
300	-42,556	29,502	2,300
350	-11,799	48,120	2,300
400	46,187	25,022	3,000
450	-16,218	-48,392	3,000
500	-42,322	-24,297	3,000
550	-36,411	36,821	3,700
600	37,814	32,010	3,700
650	52,440	-3,041	4,400
700	-24,832	-44,589	4,400
750	-40,612	27,057	4,400
800	-11,575	50,473	5,100
850	43,055	24,515	5,100
882	-14,907	-46,467	5,100
5 серия измерений			
1	53,163	3,433	0,900
50	-45,380	-24,946	0,900
100	-35,362	34,702	0,900
150	40,804	33,082	1,600
200	50,247	-2,066	1,600
250	23,195	-42,935	1,600
300	-42,555	29,503	2,300
350	-11,800	48,122	2,300
400	46,188	25,024	3,000
450	-16,218	-48,393	3,000
500	-42,321	-24,294	3,000
550	-36,410	36,821	3,700

Номер точки	Координата X, мм	Координата Y, мм	Координата Z, мм
600	37,815	32,012	3,700
650	52,443	-3,042	4,400
700	-24,833	-44,588	4,400
750	-40,613	27,055	4,400
800	-11,574	50,474	5,100
850	43,055	24,516	5,100
882	-14,909	-46,467	5,100

В соответствии с полученными данными был произведен расчет предела повторяемости $r_{X(Y)}$ результатов измерений для данного эксперимента.

Таблица 3.8 – Расчет предела повторяемости $r_{X(Y)}$ результатов измерений третьего зубчатого колеса от новой системы координат

Номер точки	r_X	r_Y
1	0,002	0,002
50	0,003	0,002
100	0,003	0,002
150	0,002	0,003
200	0,003	0,003
250	0,005	0,002
300	0,003	0,003
350	0,004	0,003
400	0,004	0,003
450	0,003	0,002
500	0,002	0,004
550	0,002	0,002
600	0,003	0,003
650	0,004	0,003
700	0,002	0,003
750	0,002	0,004
800	0,002	0,002
850	0,002	0,003
882	0,003	0,003

В ходе проведенного эксперимента по оценке повторяемости результатов измерений было установлено, что все результаты в сериях измерений не выходят за

предел повторяемости $r_{X(Y)}$, тем самым считаются приемлемыми. За результат измерений принимается среднее значение.

Таким образом можно констатировать, что используемый для контроля зубчатых колес координатный метод измерений позволяет получать достоверные результаты измерений с принятой доверительной вероятностью.

3.4 Выводы по главе 3

При разработке методического обеспечения процесса проведения координатного контроля оценке качества изготовления прямозубых зубчатых колес получены следующие результаты:

1. Предложена методика оценки результата расчета координат контрольных точек на базе ПО «Компас – 3D».

2. Разработана и апробирована методика формирования управляющей программы контроля качества прямозубых зубчатых методом координатных измерений на основе существующих возможностей ПО КИМ.

3. Проведенные исследования показали, что возможное отклонение результатов измерений не превышает 3 мкм – собственной погрешности КИМ.

4. Автором разработан комплект методических инструкций: методическая инструкция МИ 01-24 «Алгоритм расчета координат точек контроля боковой поверхности зубчатого колеса»; методическая инструкция МИ 02-24 «Алгоритм контроля расположения расчетных координат контрольных точек на боковой поверхности зубчатого колеса»; методика выполнения измерений МВИ 03-24 «Контроль геометрических параметров зубчатых колес с применением универсальных координатно-измерительных машин»; методическая инструкция МИ 04-24 «Алгоритм обработки массива координат измеренных точек боковой поверхности зубчатого колеса»; методическая инструкция МИ 05-24 «Алгоритм оценки результатов контроля зубчатого колеса».

5. Комплект методических инструкций был утвержден и принят в работу АО «АК «Туламашзавод»» и АО «Тулаточмаш».

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Полученные результаты измерений, представленные в виде числовых файлов, содержащих массива данных в виде координат контрольных точек, не являются достаточной информацией для оценки качества изготовления зубчатых колес. Это связано с тем, что нормативные требования к качеству [20, 25] содержат информацию, опирающуюся на эксплуатационные показатели, а также существующие средства измерения и методы контроля.

Несоответствие результатов координатного метода измерений и указанных параметров требует создания методики их взаимного преобразования, математической модели данного преобразования, а также адаптации данного преобразования к программному продукту.

4.1 Формирование математической модели преобразования результатов контроля

При контроле деталей на КИМ обычно получаемая информация представляет собой набор координат точек соответствующей точности в принятой локальной измерительной системе координат [44, 46].

Одной из подобных задач является определение соответствия результатов измерений параметров зубчатых колёс требованиям ГОСТ 1328-1-2017 [25]. В данной статье рассматривается вопрос оценки результатов измерений только прямозубых колёс эвольвентного зацепления.

При контроле параметров зубчатых колёс на КИМ результаты измерений представляются в числовом массиве в порядке расположения контролируемых впадин, определенных (рисунок 4.1) угловым шагом φ_{zk} данных впадин. Координаты контрольных точек боковых поверхностей зубьев заданы отдельно для правой R и левой L сторон зуба каждой впадины. Объем информации определяется количеством

уровней ($1 \leq i \leq n_h$) и количеством контрольных точек на уровне ($1 \leq i \leq n_r$) в форме параметров $X_{ijk}, Y_{ijk}, Z_{ijk}$ [60].

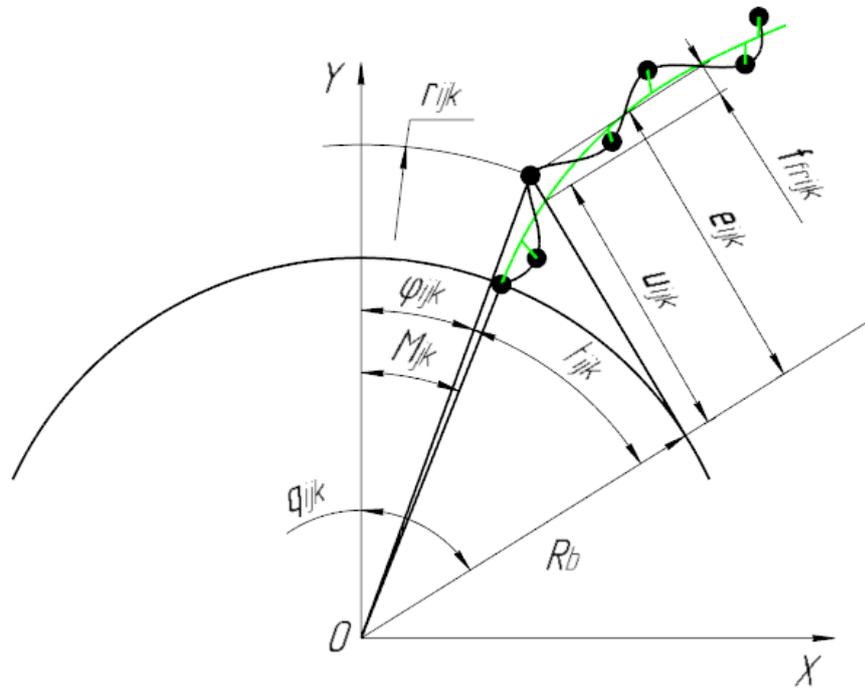


Рисунок 4.1 – Определение начала аппроксимирующей эвольвенты φ_{ijk} – угловая координата положения контрольной точки – i , зуба – k , уровня расположения вдоль длины зуба – j ; r_{ilk} – радиус контрольной точки; α_{ijk} – угол зацепления точки i , q_{ilk} – угол положения центра радиуса кривизны; ρ_{ijk} – радиус кривизны точки аппроксимирующей эвольвенты; e_{ijk} – расстояние до контрольной точки; f_{fijk} – погрешность профиля

Предварительно для контрольных точек необходимо рассчитать основные параметры: радиус контролируемой точки – r_{ilk} , координатный угол – φ_{ijk} , радиус кривизны – ρ_{ijk} :

$$r = \frac{m_n Z_k}{2}, \quad (4.1)$$

$$R_b = r \cdot \cos \alpha_n, \quad (4.2)$$

$$\varphi_{ijk} = \arctg \frac{Y_{ijk}}{X_{ijk}}, \quad (4.3)$$

$$r_{ijk} = \sqrt{X_{ijk}^2 + Y_{ijk}^2}, \quad (4.4)$$

$$\cos \alpha_{ijk} = \frac{R_b}{r_{ijk}}. \quad (4.5)$$

За начало расчетов принималась эвольвента, проходящая через точку с наименьшим радиусом r_{ilk} из точек одного уровня. Угол начала данной эвольвенты определяется как:

$$\mu_{ijk} = \varphi_{ijk} \pm tg\alpha_{ijk} \mp \alpha_{ijk}. \quad (4.6)$$

По нормали к данной эвольвенте определяются отклонения всех точек i уровня:

$$\Delta_{ijk} = e_{ijk} - \rho_{ijk}, \quad (4.7)$$

$$e_{ijk} = r_{ijk} \sin \alpha_{ijk}, \quad (4.8)$$

$$\rho_{ijk} = (\varphi_{ijk} \pm \alpha_{ijk} \mp \mu_{ijk}) \cdot R_b. \quad (4.9)$$

Знаки «+» и «-» принимаются для левой и правой сторон зуба соответственно. Далее определяется сумма квадратов погрешностей:

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{n_r} \Delta_{ijk}^2. \quad (4.10)$$

Изменяя μ_{ijk} добиваются, чтобы $\Delta_{\Sigma} = \min$.

Данная операция повторяется для всех уровней одной стороны зуба для определения начал эвольвент всех уровней μ_{ijk} . Если расстояние между данными эвольвентами не превышает половины допуска на толщину зуба, боковая поверхность принимается прямолинейной, а ее начало μ_k определяется как среднее значение из μ_{jk} .

В случае, если наблюдается смещение начал аппроксимирующих эвольвент относительно оси колеса больше, чем половина допуска на толщину зуба, то определяется погрешность направления зуба. Расчет производится следующим образом (рисунок 4.2):

- по основному цилиндру через точку начала расчетного эвольвентного профиля μ_k проводится направляющая боковой поверхности параллельно оси колеса;

- на данной прямой определяется точка, соответствующая середине зуба ($Z = 0,5h_3$);
- поворачивая направляющую вокруг данной точки на угол α_ϕ определяют положение направляющей на каждом контрольном уровне

$$\mu_{HjK} = \mu_K + (0.5h_3 - X_{iK}) \operatorname{tg} \alpha_\phi \frac{1}{R_b}. \quad (4.11)$$

Сравнивая данные значения с найденными ранее началами эвольвент для каждого уровня:

$$\Delta_{j\mu k} = \mu_{Hik} - \mu_{ik}, \quad (4.12)$$

изменяя α_ϕ добиваются, чтобы:

$$\sum_{i=1}^{n_r} \Delta_{i\mu k}^2 = \min. \quad (4.13)$$

Погрешность направления зуба определится как:

$$F_{\beta r} = h_3 \operatorname{tg} \alpha_\phi. \quad (4.14)$$

Оценку значения $F_{\beta r}$ можно производить как выбор максимального значения из всех значений, полученных по контролируемым боковым поверхностям зубьев, либо по среднему значению из данных величин.

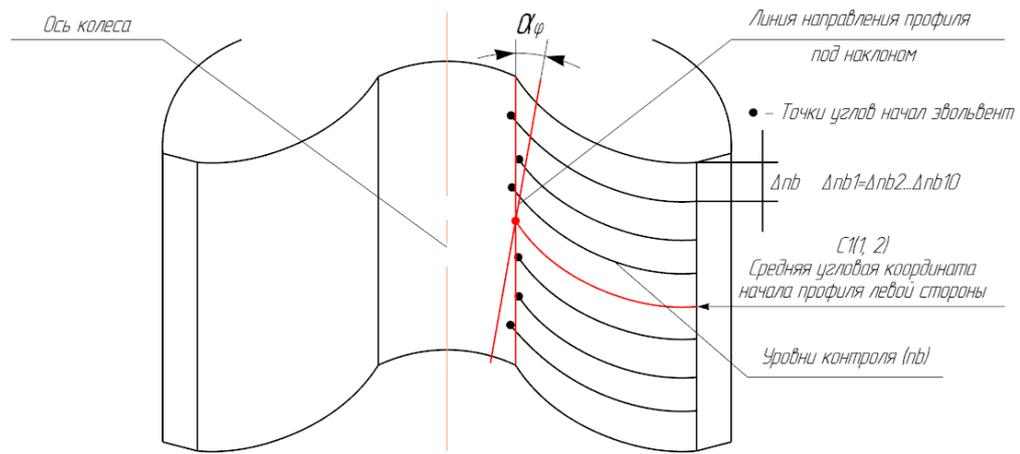


Рисунок 4.2 – Определение погрешность направления зуба

Радиальное биение зубчатого колеса F_{rr} – один из основных эксплуатационных показателей зубчатого колеса, заключающийся в несоосности оси зубчатого венца и оси установочной базовой поверхности (посадочного отверстия) колеса.

Расчет биения может производиться по четырем или более зубьям или впадинам, расположенным симметрично по всему зубчатому венцу. Для этого предварительно принимается совпадение осей зубчатого венца и базового отверстия. Учитывая рекомендации для КИМ, приведенные выше, контролю должны подлежать 9 впадин между зубьями, что достаточно для определения параметра F_{rr} .

Предварительно для всех впадин (см. выше) определяются начала эвольвентных поверхностей, аппроксимирующих боковые поверхности зубьев. Далее определяются координаты $X_{dL(R)k}$ и $Y_{dL(R)k}$ пересечения данных поверхностей (L – левых, R – правых) с делительным цилиндром (r) колеса

$$\begin{cases} X_{dL(R)k} = r \cdot \sin(\mu_{L(R)k} \pm inv \alpha_d) \\ Y_{dL(R)k} = r \cdot \cos(\mu_{L(R)k} \pm inv \alpha_d) \end{cases}; \quad (4.15)$$

$$inv \alpha_d = tg \alpha_d - \alpha_d; \quad (4.16)$$

$$\cos \alpha_d = \frac{R_b}{r}. \quad (4.17)$$

Радиальное биение определяется по колебанию размеров впадин между зубьями по дуге делительной окружности. для упрощения расчетов длина дуги может быть заменена размером хорды (рисунок 4.3):

$$b_k = \sqrt{(X_{dLk} - X_{dRk})^2 + (Y_{dLk} - Y_{dRk})^2}. \quad (4.18)$$

Из полученных 9 значений b_k выбирают b_{kMAX} и b_{kMIN} и определяют величину разности:

$$\Delta_b = b_{kMAX} - b_{kMIN}. \quad (4.19)$$

Если Δ_b не превышает 0,01 мм расчет радиального биения не производится. В противном случае производятся следующие действия:

- центр зубчатого венца точка O' и расчетная $X'Y'Z'$ система координат (рисунок 4.4) смещается относительно центра базового отверстия O и локальной системы координат XYZ на малые Δ_x и Δ_y приращения;

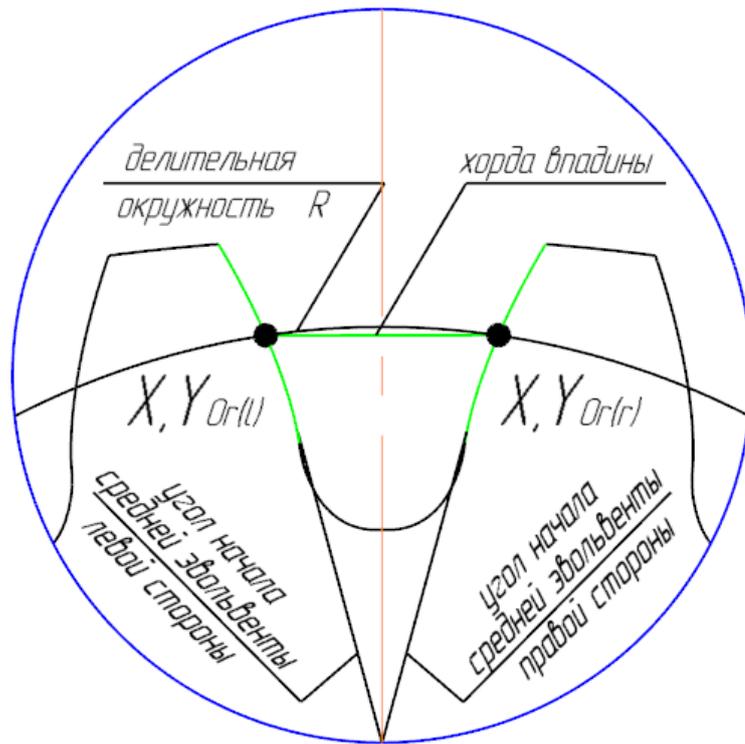


Рисунок 4.3 – Определение начальной длины хорды на примере одной впадины

- производится перерасчет значений измеренных координат точек в расчетную систему $X'Y'Z'$

$$\begin{cases} X'_{ijk} = X_{ijk} - \Delta_X \\ Y'_{ijk} = Y_{ijk} - \Delta_Y ; \\ Z'_{ijk} = Z_{ijk} \end{cases} \quad (4.20)$$

- в данной системе относительно центра O' строится основная окружность радиуса R_b ;
- по зависимостям (4.1) определяются расчетные параметры контрольных точек в системе координат $X'Y'Z'$;
- по зависимостям (4.2–4.5) определяются углы μ_k' начал эвольвент, аппроксимирующих боковые поверхности зубьев, на окружности радиуса R_b в системе координат $X'Y'Z'$ с учетом минимума суммы квадратов отклонений на каждом уровне и принятием среднего значения для всех уровней одной боковой поверхности;

- в системе $X'Y'Z'$ задается делительный цилиндр радиуса r и по формулам (4.15) определяются координаты точек $X'_{dL(R)k}$ и $Y'_{dL(R)k}$ пересечения делительного цилиндра с эвольвентами, аппроксимирующими боковые поверхности зубьев;
- далее по зависимостям (4.18) и (4.19) определяют величины хорд b'_k расстояний между боковыми поверхностями зубьев на делительном диаметре в пределах одной впадины и определяют максимальную разность Δ'_b среди всех расчетных впадин;
- изменяя величины приращений Δ_X и Δ_Y , добиваются минимального значения Δ'_b .

Величина радиального биения составит:

$$F_{rr} = \sqrt{\Delta_X^2 + \Delta_Y^2}. \quad (4.21)$$

Учитывая, что в процессе измерений формирование локальной измерительной системы координат проводилось в ручном режиме однократным касанием сторон впадины зубьев, принятой за базовую необходимо провести выравнивание полученных в результате контроля значений координат контрольных точек [108]. Наиболее рационально это провести по параметрам первой впадины. Для этого определяют угловое положение середины впадины:

$$\Delta_\mu = \frac{\mu_{L1} + \mu_{R1}}{2}. \quad (4.22)$$

После этого производится перерасчет всех координат контрольных точек из базовой системы в расчетную:

$$\begin{cases} X'_{ijk} = X_{ijk} \sin \Delta_\mu \\ Y'_{ijk} = Y_{ijk} \cos \Delta_\mu \\ Z'_{ijk} = Z_{ijk} \end{cases} \quad (4.23)$$

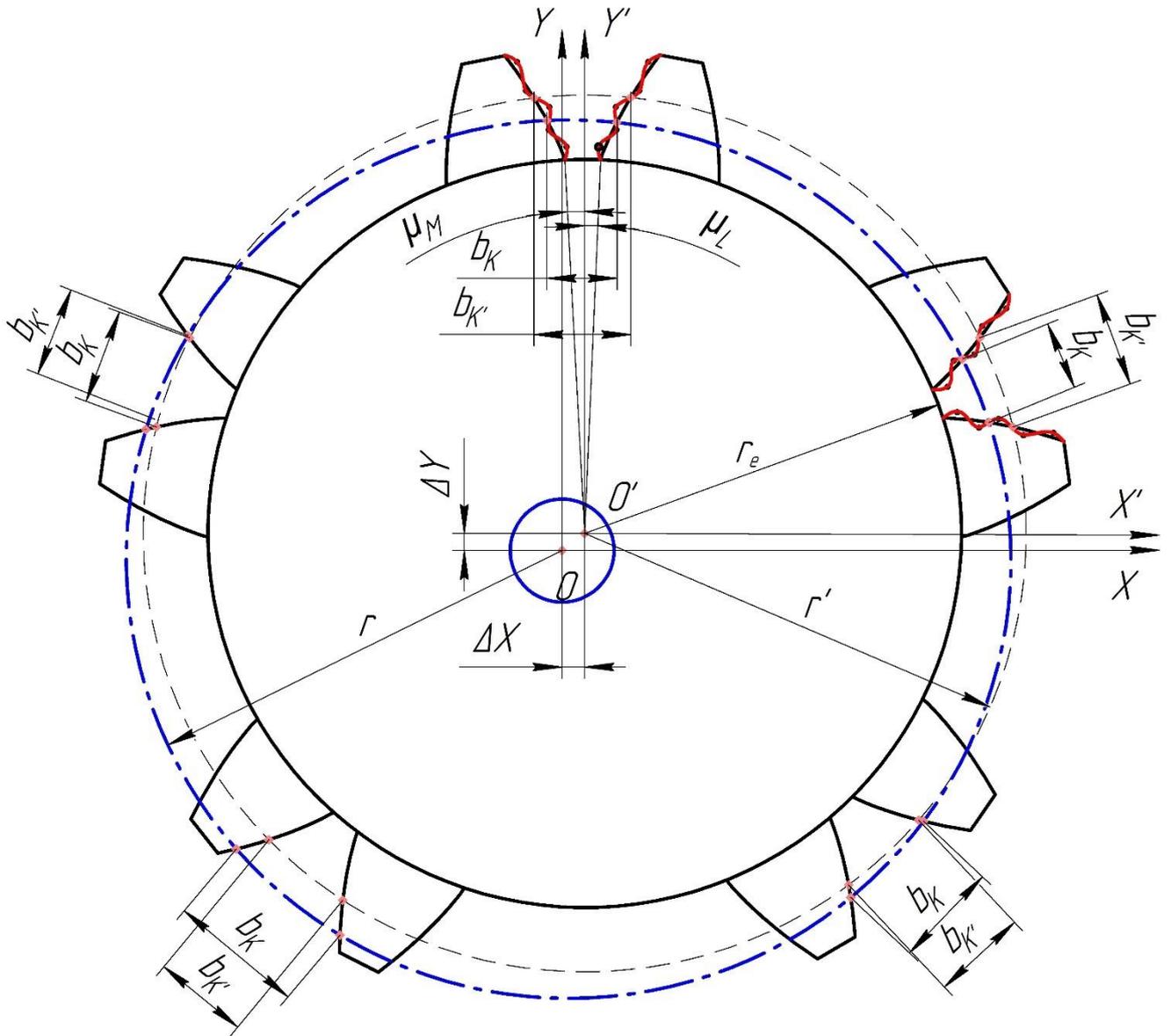


Рисунок 4.4 – Схема определения радиального биения F_{rr} зубчатого венца относительно базового отверстия

Производится перерасчет положения начальных точек аппроксимирующих боковых поверхностей зубьев относительно основного цилиндра:

$$\mu'_{L(R)k} = \mu_{L(R)k} + \Delta_{\mu}. \quad (4.24)$$

После определения параметров эвольвентных поверхностей, аппроксимирующих боковые поверхности зубьев, для каждой контрольной точки рассчитывается погрешность профиля по зависимостям 4.1-4.5 (рисунок 4.1).

$$f_{frijk} = \Delta_{ijk}. \quad (4.25)$$

Из полученных f_{frijk} для каждой боковой поверхности выбирается максимальное значение $f_{frijkmin}$ и $f_{frijkmax}$, по которым и ведется оценка качества зубчатого колеса. Анализ положения значений $f_{frijkmin}$ и $f_{frijkmax}$ вдоль поверхности зуба позволит определить причины возникающих погрешностей.

Шаг зацепления P_b представляет собой кратчайшее расстояние между двумя параллельными плоскостями, касательными к двум одноименным активным боковым поверхностям соседних зубьев [28, 38]. Определение погрешности шага зацепления – f_{Pbr} производится только в том случае, если контролю подлежат соседние впадины. Согласно рекомендаций, приведенных в главе 2, такими являются $k = 2$ и $k = 3, k = 5$ и $k = 6, k = 8$ и $k = 9$ (рисунок 2.10), при этом величина шага может быть определена как по левой L так и по правой R сторонам впадины:

$$f_{PbrL(R)k,k+1} = R_b(\mu_{L(R)k+1} - \mu_{L(R)k}). \quad (4.26)$$

При необходимости в конечный результат может быть добавлена наибольшая погрешность профиля, соответствующая контролируемым поверхностям (рисунок 4.5).

$$f_{PbrL(R)k,k+1} = R_b(\mu_{L(R)k+1} - \mu_{L(R)k}) + f_{frL(R)k(k+1)max}. \quad (4.27)$$

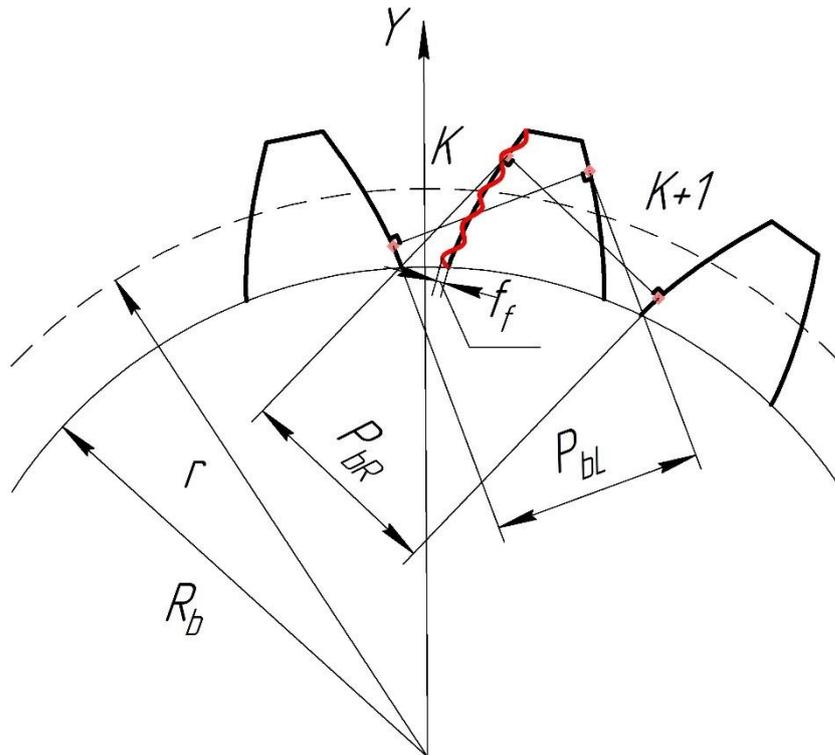


Рисунок 4.5 – Схема определения погрешности шага зацепления f_{Pbr}

Колебание длины общей нормали F_{uWr} определяется постоянством расстояния между боковыми сторонами зубьев (левыми и правыми), которое может соблюдаться только на отдельных участках. В зависимости от числа зубьев колес Z_k данное явление наблюдается только через 3 или 4 зуба [78, 79, 80]. Данное условие заложено в программу контроля (рисунок 2.10) и F_{uWr} может быть определена между боковыми поверхностями зубьев $k = 1$ и $k = 2$ (3), $k = 4$ и $k = 5$ (6), $k = 7$ и $k = 8$ (9) (рисунок 4.6).

$$F_{uWr} = R_b(\mu_{Rk+1(2)} - \mu_{Lk}). \quad (4.28)$$

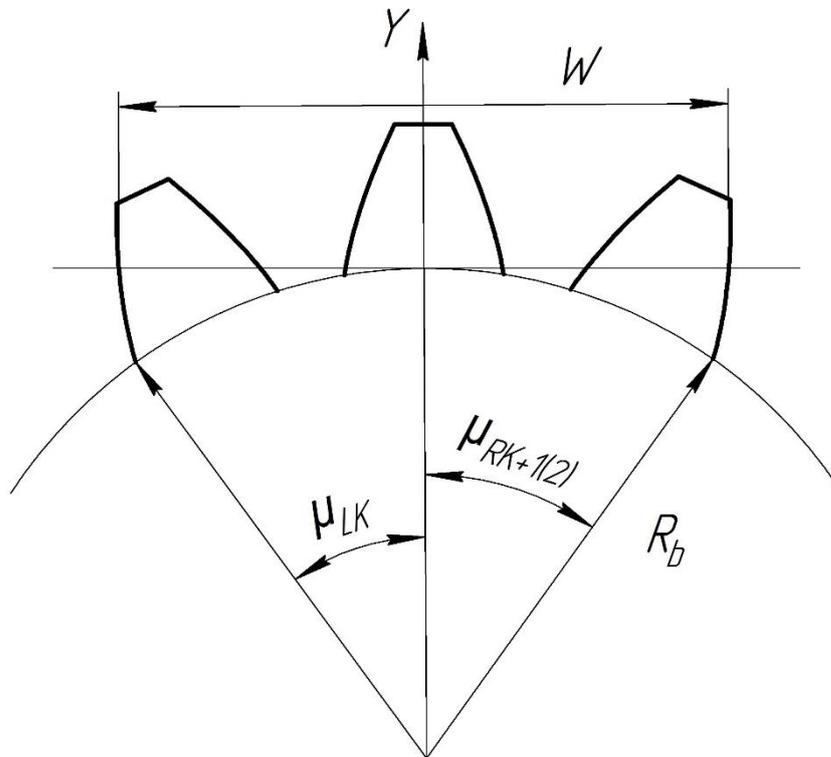


Рисунок 4.6 – Схема определения длины общей нормали

При необходимости в конечный результат также может быть добавлена наибольшая погрешность профиля, соответствующая контролируемым поверхностям.

Требования по соблюдению заданного бокового зазора обычно определяются нахождением дополнительного смещения исходного контура $E_{Hk,k+1}$. Данный па-

раметр может быть определен по фактической толщине зуба на делительном диаметре. Данный расчет может быть проведен, если имеются результаты контроля боковых поверхностей одного зуба. Согласно рекомендаций главы 2 (рисунок 2.10), такими зубьями являются - располагающиеся между следующими впадинами $k = 2$ и $k = 3$, $k = 5$ и $k = 6$, $k = 8$ и $k = 9$, то есть указанный выше параметр может быть определен в 3-х точках примерно равномерно смещенных по зубчатому венцу. Толщина зуба S_3 по дуге делительной окружности r определится как

$$S_3 = (\mu_{L,k+1} - \mu_{RK} - 2 \operatorname{inv} \alpha_n) \cdot r, \quad (4.29)$$

$$\operatorname{inv} \alpha_n = \operatorname{tg} \alpha_n - \alpha_n. \quad (4.30)$$

Фактическое дополнительное смещение исходного контура $E_{Hk,k+1}$ определится как (рисунок 4.7).

$$E_{Hk,k+1} = \frac{0,5\pi m_n - S_3}{2 \operatorname{tg} \alpha_n}. \quad (4.31)$$

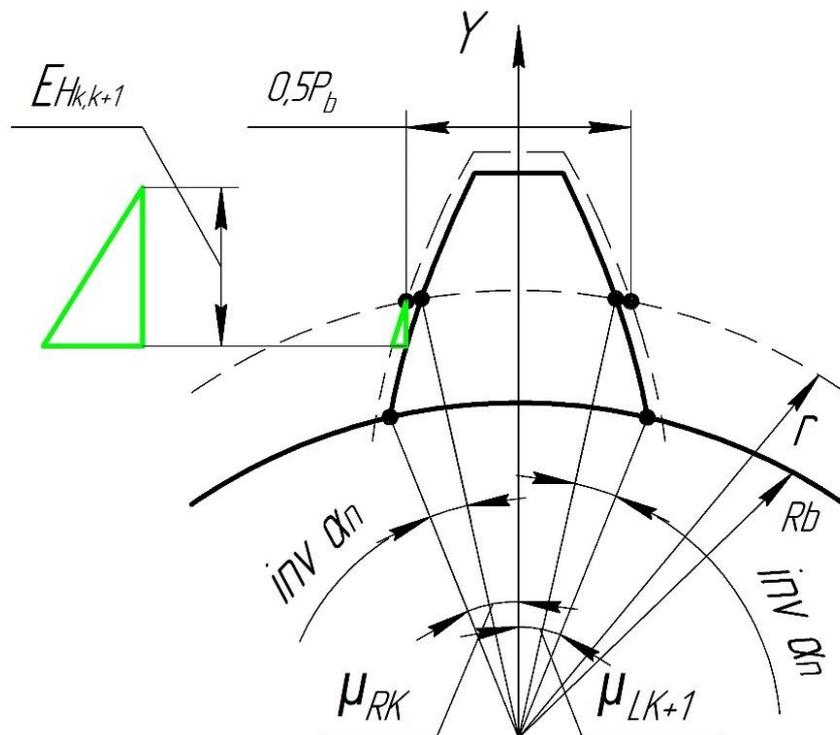


Рисунок 4.7 – Схема определения фактического дополнительного исходного смещения контура

Приведенные выше зависимости явились основой для создания программы по обработке данных для оценки качества контролируемых колес [73, 83, 97].

4.2 Формирование алгоритма программы перевода результатов контроля в нормативные показатели

На основании приведенных выше математических зависимостей было разработано ПО, алгоритм работы которого представлен на рисунке 4.8.

Данное ПО сформировано в системе проектирования Visual Basic.

Исходные данные, хранящиеся в файлах «Исходные данные.txt» (модуль зубчатого колеса – m_n , число зубьев колеса – Z_K , коэффициент смещения исходного контура – X , диаметр вершин зубьев – d_a , допуск на диаметр – IT, наименьшее дополнительное смещение исходного контура – E_{Hs} , допуск на смещение исходного контура – T_H , ширина зуба – h_3) вводятся в программу следующей процедурой:

```
Open App.Path & "\Исходные данные.txt"
```

```
For Input As #s
```

```
While Not EOF(s)
```

```
Input #s, nl, nb, mn, z, X, Es, Tn, an, rb, rl
```

```
Wend
```

```
Close #s
```

Файл «Результаты измерений.txt» ($X_{ijk}, Y_{ijk}, Z_{ijk}; i = n_h, j = n_r, k = n_k$)

вводится в программу следующей процедурой:

```
Open App.Path & "\Результаты измерений.txt"
```

```
Input #WW, u1, u2, u3, u4, u5, u6, u7
```

Введенные данные записываются в программе в сформированные массивы данных, результаты измерений каждой впадины записываются в номерные массивы – для левой стороны впадины в массивы А, для правой – в массивы В:

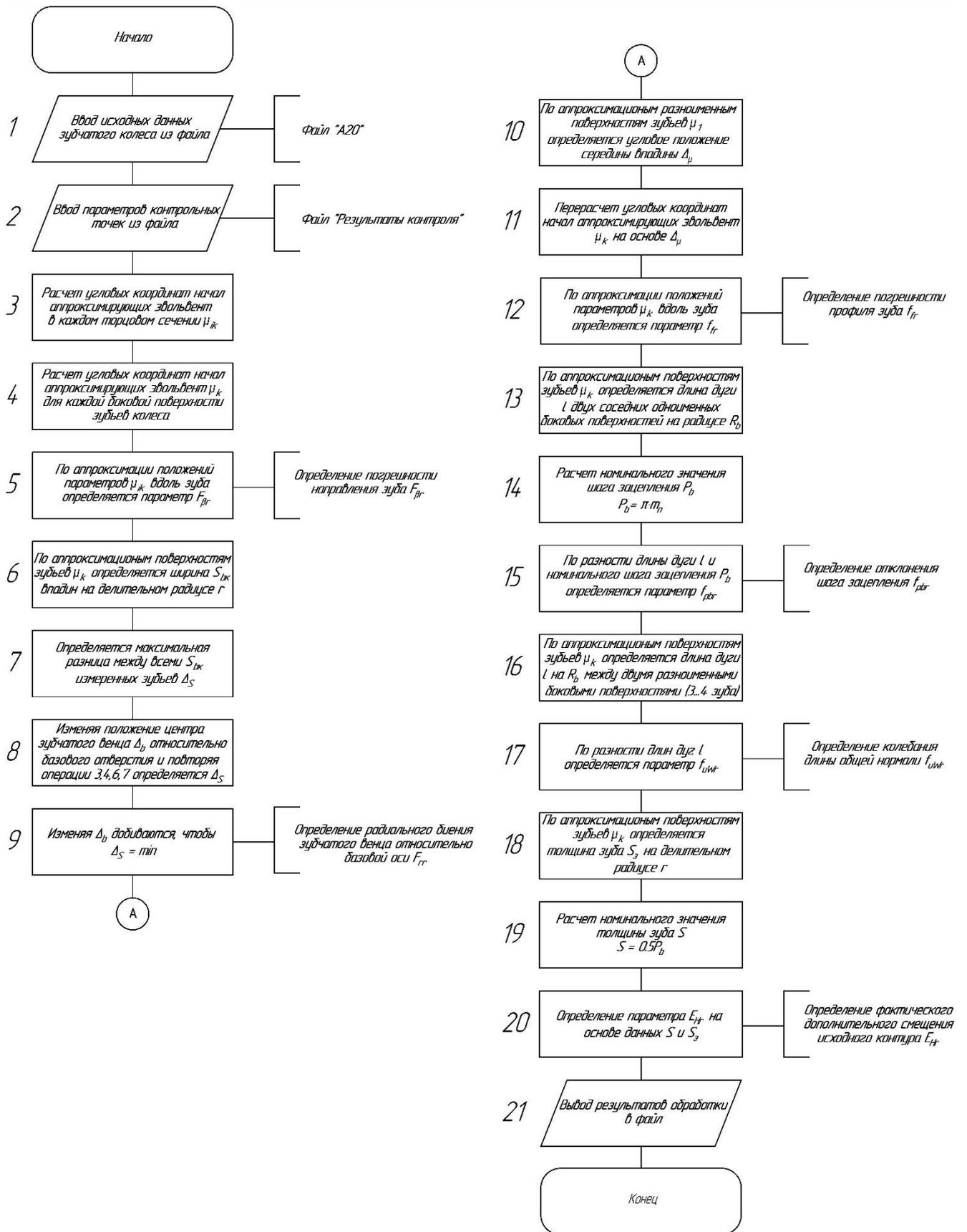


Рисунок 4.8 – Алгоритм перевода результатов контроля в нормативные показатели

Dim A1(10, 10, 7), B1(10, 10, 7), A2(10, 10, 7), B2(10, 10, 7), A3(10, 10, 7), B3(10, 10, 7), A4(10, 10, 7), B4(10, 10, 7);

Dim A5(10, 10, 7), B5(10, 10, 7), A6(10, 10, 7), B6(10, 10, 7), A7(10, 10, 7), B7(10, 10, 7), A8(10, 10, 7), B8(10, 10, 7);

Dim A9(10, 10, 7), B9(10, 10, 7), A10(10, 10, 7), B10(10, 10, 7), A01(10, 10, 4), B01(10, 10, 4), C(10, 2, 10), C1(10, 4).

Далее проводятся расчеты по алгоритму (рисунок 4.8) и зависимостям, представленным в разделе 4.1. Результаты расчетов представляются в следующей форме (рисунок 4.9).

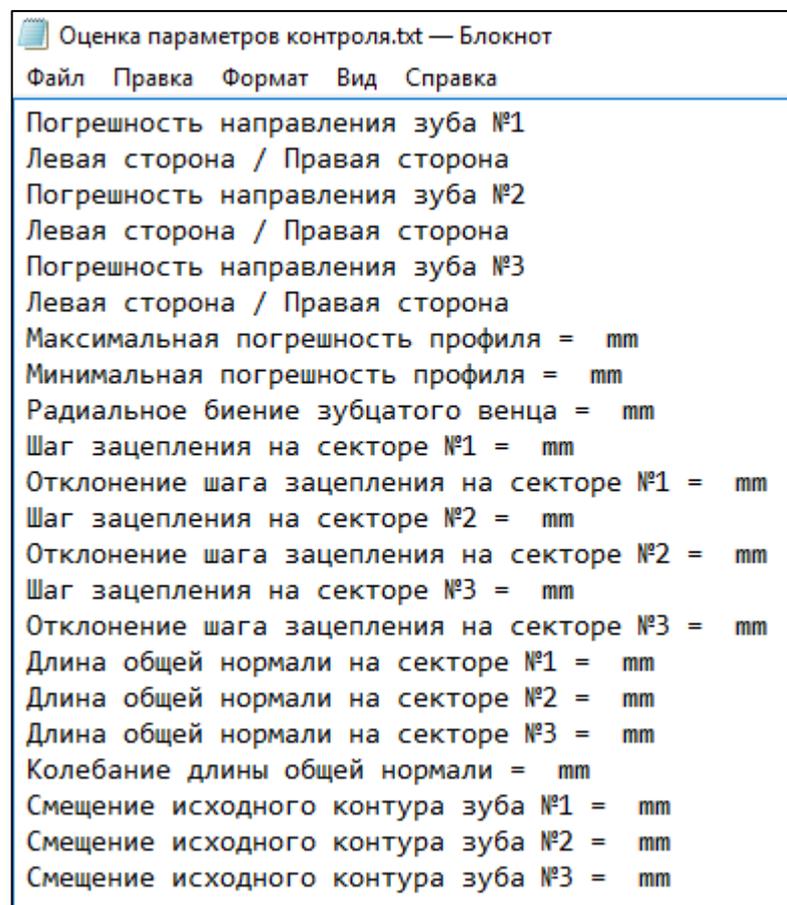


Рисунок 4.9 – Форма представления результатов обработки данных

Согласно положенному в основу программы алгоритма, погрешность направления зубьев колеса определяется отдельно для их левой и правой сторон, погрешность профиля определяется по минимальному и максимальному значению полученных отклонений, радиальное биение зубчатого венца рассчитывается по всем

контролируемым боковым поверхностям, отклонение шага зацепления, колебание длины общей нормали и фактическое дополнительное смещение исходного контура определяется для трех контролируемых секторов (участков) колеса.

Полученные результаты сравниваются с данными ГОСТ 1643-81, по которым нормировано колесо на чертеже.

Данный алгоритм был положен в основу созданного ПО, зарегистрированного в федеральной службе по интеллектуальной собственности, рег. №2024686365 от 07.11.2024 [4, 73] (приложение А).

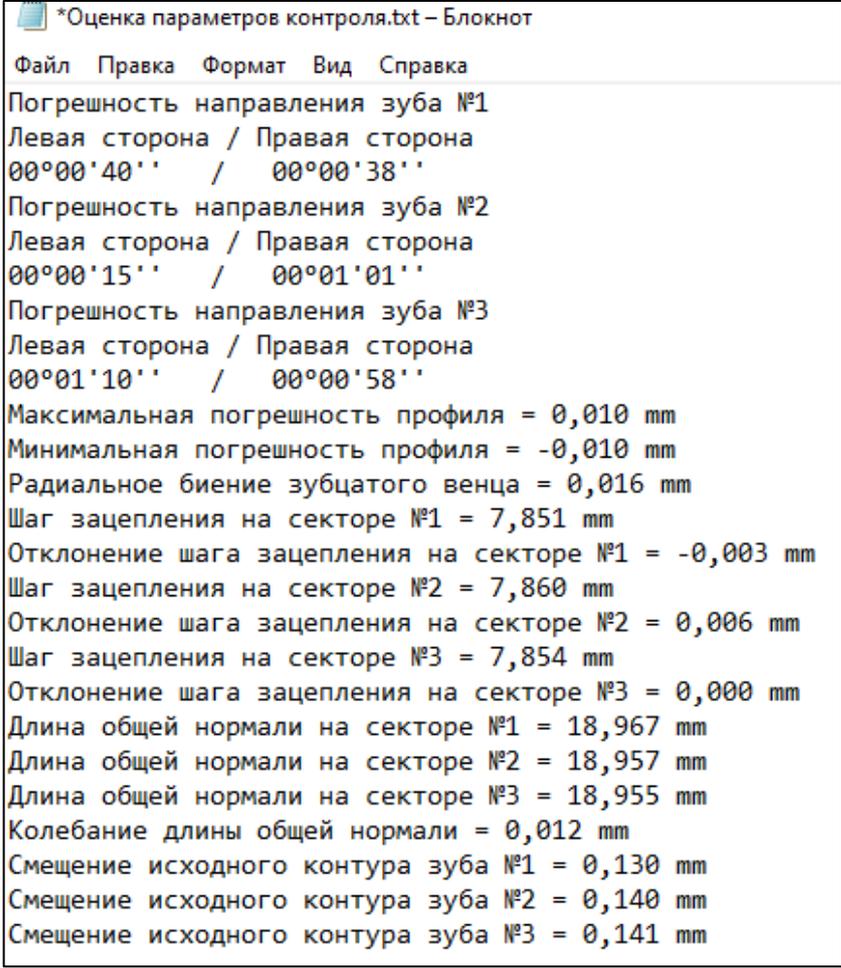
4.3 Оценка результатов координатного контроля с помощью программно-вычислительного комплекса контроля геометрических параметров зубчатых колес

В соответствии с алгоритмом работы разработанного ПО и порядком выполнения работ, для зубчатого колеса (рисунок 4.10) со следующими исходными данными: $m_n - 2,5$ мм; $Z - 3$; $X - (-0,25)$; $d_a - 78,7$ мм; IT – h12; $E_{Hs} - (-0,09)$ мм; $T_H - 0,12$ мм; $h_3 - 13$ мм был выполнен расчет координат точек контрольных сеток боковых поверхностей зубьев.



Рисунок 4.10 – Контролируемое зубчатое колесо №1

На основе отредактированных данных производится оценка показателей качества зубчатых колес (рисунок 4.11).



```

*Оценка параметров контроля.txt – Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
Погрешность направления зуба №1
Левая сторона / Правая сторона
00°00'40'' / 00°00'38''
Погрешность направления зуба №2
Левая сторона / Правая сторона
00°00'15'' / 00°01'01''
Погрешность направления зуба №3
Левая сторона / Правая сторона
00°01'10'' / 00°00'58''
Максимальная погрешность профиля = 0,010 mm
Минимальная погрешность профиля = -0,010 mm
Радиальное биение зубчатого венца = 0,016 mm
Шаг зацепления на секторе №1 = 7,851 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №1 = -0,003 mm
Шаг зацепления на секторе №2 = 7,860 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №2 = 0,006 mm
Шаг зацепления на секторе №3 = 7,854 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №3 = 0,000 mm
Длина общей нормали на секторе №1 = 18,967 mm
Длина общей нормали на секторе №2 = 18,957 mm
Длина общей нормали на секторе №3 = 18,955 mm
Колебание длины общей нормали = 0,012 mm
Смещение исходного контура зуба №1 = 0,130 mm
Смещение исходного контура зуба №2 = 0,140 mm
Смещение исходного контура зуба №3 = 0,141 mm

```

Рисунок 4.11 – Оценка показателей качества зубчатого колеса

Сравнивая полученные результаты оценки показателей качества контролируемого зубчатого колеса с их нормативными значениями, представленными в ГОСТ 1643-81, было установлено что значения контролируемых параметров данного колеса не выходят за их допустимые пределы отклонений, колесо признается годным по всем измеряемым показателям (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Сравнение результатов оценки показателей качества зубчатого колеса с нормируемыми значениями отклонений

№ п/п	Контролируемый параметр	Результат измерения, мкм	Допуск, мкм
1	Погрешность профиля зуба (F_{fr})	10	14
2	Радиальное биение зубчатого венца (F_{rr})	16	45
3	Отклонение шага зацепления (f_{pbr})	6	± 19
4	Колебание длины общей нормали (F_{uWr})	12	28
5	Фактическое дополнительное смещение исходного контура зуба (E_{Hr})	141	210

Результаты измерений данного зубчатого колеса практически совпадают с результатами контроля ручными по степени автоматизации средствами измерений по таким параметрам как радиальное биение (f_{rr}) и длина общей нормали (F_{uWr}), полученными в условиях ООО «Станкотехника» (рисунок 4.12).

ООО «Станкотехника»

Аттестат № 148

“ 11 ” 09 2024 г.

077 110 129 - шестерня

факт W 19,0737^{+0,06}_{-0,12} мм

факт W 18,96 мм

эл. → 0016 мм

зав. и.о.  Семин

Рисунок 4.12 – Аттестат ООО «Станкотехника»

Однако, единичный расчет не позволяет получить достоверный результат контроля, поэтому для дальнейшего исследования достоверности как методики контроля, так и методики обработки данных, проводились следующие дополнительные измерения.

Так, для определения достоверности получаемых результатов контроля были произведены измерения данного зубчатого колеса от других «базовых» поверхностей № 2 и № 3 (рисунок 4.13).



Рисунок 4.13 – Вариант расположение «базовых» боковых поверхностей

Результаты оценки показателей качества от базовых поверхностей № 2 и № 3 представлены на рисунках 4.14 и 4.15, соответственно.

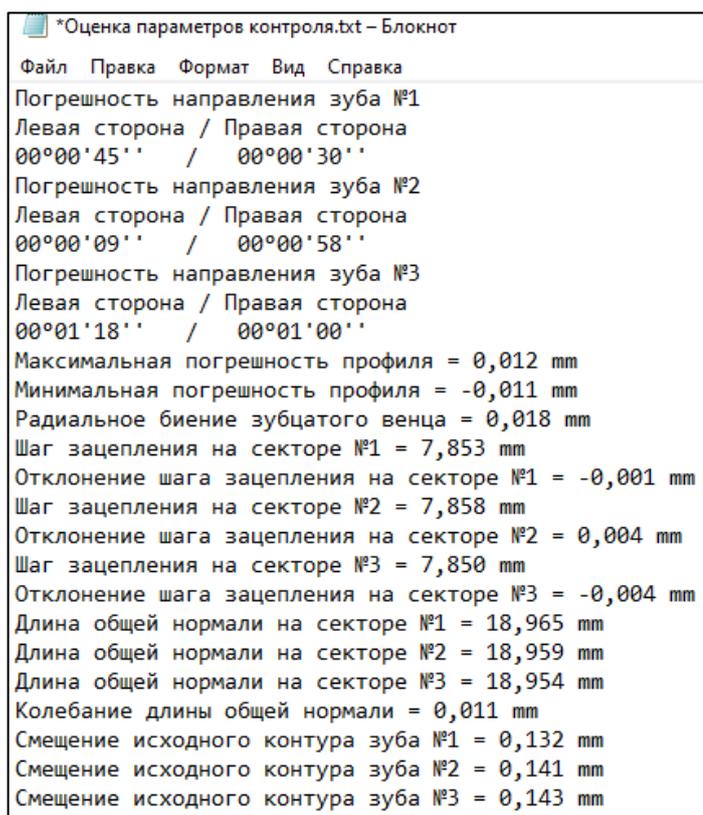


Рисунок 4.14 – Оценка показателей качества зубчатого колеса относительно базовой поверхности № 2

По представленным результатам контроля было установлено, что изменение результатов всех контролируемых показателей качества, полученных при расчете от различных базовых поверхностей, не превышает 3 мкм, результаты контроля в данном случае можно признать достоверными. Учитывая, что при смене базы контролю подвергались ранее не измеряемые боковые поверхности колеса, можно сделать вывод о равномерности обработки данной детали.

На основании приведенных результатов контроля, полученных относительно различных базовых поверхностей, производится расчет предела воспроизводимости (R) [50] контролируемых показателей качества зубчатых колес (таблица 4.2).

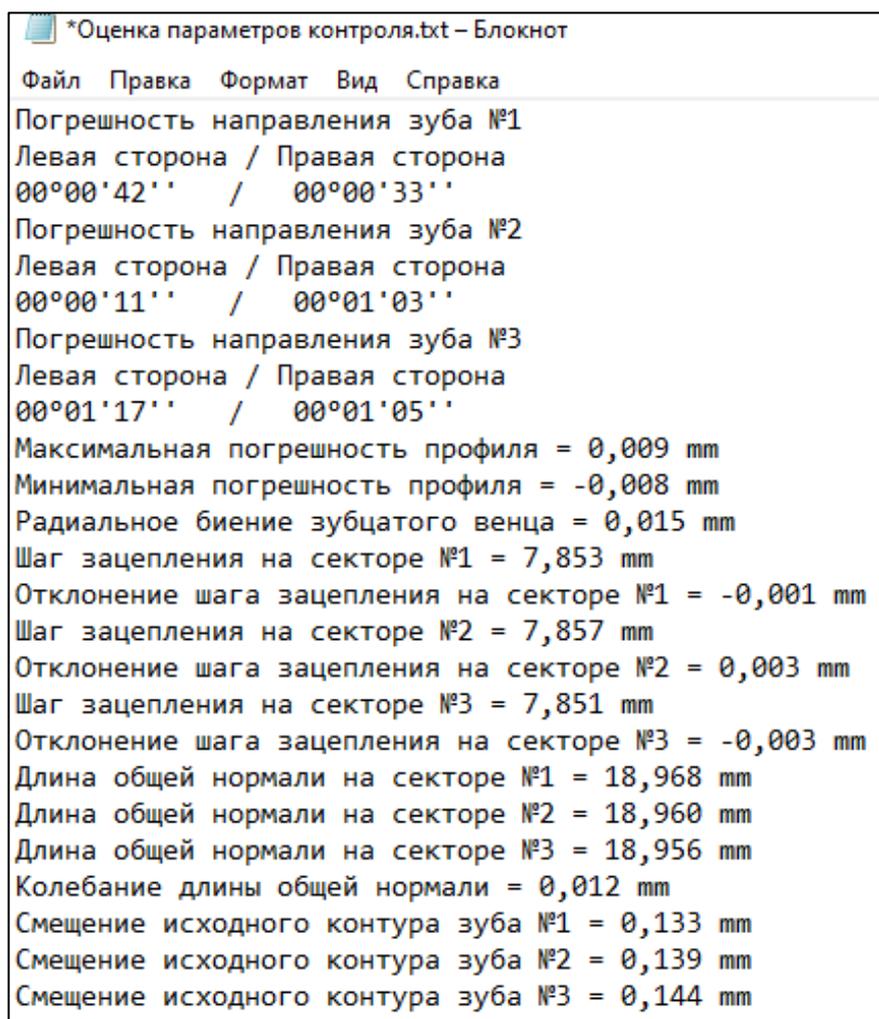


Рисунок 4.15 – Оценка показателей качества зубчатого колеса относительно базовой поверхности №3

Таблица 4.2 – Расчет предела воспроизводимости измерений для контролируемых показателей качества зубчатых колес

Показатель (параметр) качества	R, %
Погрешность направления зуба	1,5
Погрешность профиля зуба	5,0
Радиальное биение зубчатого венца	0,6
Отклонение шага зацепления	0,5
Колебание длины общей нормали	0,5
Фактическое наименьшее дополнительное смещение исходного контура	0,5

Учитывая полученные значения пределов воспроизводимости (R), выполняется оценка воспроизводимости результатов измерений, путем их сравнения друг с другом:

$$S_{max} - S_{min} \leq R, \quad (4.23)$$

$$R = f(n) \cdot \sigma. \quad (4.24)$$

Если разность результатов по абсолютной величине не превосходит предела воспроизводимости (R) для измеряемого показателя из таблицы 4.1, то воспроизводимость результатов контроля признают удовлетворительной. В противном случае выясняют причины больших расхождений и после их устранения повторяют процедуру контроля воспроизводимости.

По результатам проведенной оценки, больших расхождений в результатах измерений выявлено не было, воспроизводимость признается удовлетворительной.

Для дополнительной оценки достоверности получаемых результатов измерений была проконтролирована небольшая группа зубчатых колес в количестве 4 штук (рисунок 4.16) с аналогичными исходными данными. По полученным данным измерений была проведена их оценка, результаты которой представлены ниже, для каждого контролируемого зубчатого колеса из группы (рисунки 4.17–4.20).



Рисунок 4.16 – Группа контролируемых зубчатых колес

```

*Оценка параметров контроля.txt – Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
Погрешность направления зуба №1
Левая сторона / Правая сторона
00°00'05'' / -00°00'28''
Погрешность направления зуба №2
Левая сторона / Правая сторона
00°00'29'' / 00°01'40''
Погрешность направления зуба №3
Левая сторона / Правая сторона
00°01'02'' / 00°00'30''
Максимальная погрешность профиля = 0,007 mm
Минимальная погрешность профиля = -0,006 mm
Радиальное биение зубчатого венца = 0,015 mm
Шаг зацепления на секторе №1 = 7,854 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №1 = 0,000 mm
Шаг зацепления на секторе №2 = 7,856 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №2 = 0,002 mm
Шаг зацепления на секторе №3 = 7,859 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №3 = 0,005 mm
Длина общей нормали на секторе №1 = 18,970 mm
Длина общей нормали на секторе №2 = 18,973 mm
Длина общей нормали на секторе №3 = 18,966 mm
Колесание длины общей нормали = 0,007 mm
Смещение исходного контура зуба №1 = 0,148 mm
Смещение исходного контура зуба №2 = 0,138 mm
Смещение исходного контура зуба №3 = 0,136 mm

```

Рисунок 4.17 – Оценка показателей качества первого зубчатого колеса из группы

```

*Оценка параметров контроля.txt – Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
Погрешность направления зуба №1
Левая сторона / Правая сторона
00°00'04'' / -00°00'27''
Погрешность направления зуба №2
Левая сторона / Правая сторона
00°00'43'' / 00°01'28''
Погрешность направления зуба №3
Левая сторона / Правая сторона
00°00'51'' / 00°00'36''
Максимальная погрешность профиля = 0,012 mm
Минимальная погрешность профиля = -0,004 mm
Радиальное биение зубчатого венца = 0,018 mm
Шаг зацепления на секторе №1 = 7,855 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №1 = 0,001 mm
Шаг зацепления на секторе №2 = 7,855 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №2 = 0,001 mm
Шаг зацепления на секторе №3 = 7,862 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №3 = 0,008 mm
Длина общей нормали на секторе №1 = 18,973 mm
Длина общей нормали на секторе №2 = 18,972 mm
Длина общей нормали на секторе №3 = 18,965 mm
Колесание длины общей нормали = 0,008 mm
Смещение исходного контура зуба №1 = 0,145 mm
Смещение исходного контура зуба №2 = 0,135 mm
Смещение исходного контура зуба №3 = 0,133 mm

```

Рисунок 4.18 – Оценка показателей качества второго зубчатого колеса из группы

```

*Оценка параметров контроля.txt – Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
Погрешность направления зуба №1
Левая сторона / Правая сторона
00°00'10'' / -00°00'39''
Погрешность направления зуба №2
Левая сторона / Правая сторона
00°00'25'' / 00°01'30''
Погрешность направления зуба №3
Левая сторона / Правая сторона
00°01'11'' / 00°00'39''
Максимальная погрешность профиля = 0,008 mm
Минимальная погрешность профиля = -0,005 mm
Радиальное биение зубчатого венца = 0,018 mm
Шаг зацепления на секторе №1 = 7,852 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №1 = -0,002 mm
Шаг зацепления на секторе №2 = 7,857 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №2 = 0,003 mm
Шаг зацепления на секторе №3 = 7,860 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №3 = 0,006 mm
Длина общей нормали на секторе №1 = 18,970 mm
Длина общей нормали на секторе №2 = 18,975 mm
Длина общей нормали на секторе №3 = 18,968 mm
Колебание длины общей нормали = 0,007 mm
Смещение исходного контура зуба №1 = 0,146 mm
Смещение исходного контура зуба №2 = 0,136 mm
Смещение исходного контура зуба №3 = 0,134 mm

```

Рисунок 4.19 – Оценка показателей качества третьего зубчатого колеса из группы

```

Оценка параметров контроля.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
Погрешность направления зуба №1
Левая сторона / Правая сторона
00°00'20'' / -00°00'18''
Погрешность направления зуба №2
Левая сторона / Правая сторона
00°00'33'' / 00°01'15''
Погрешность направления зуба №3
Левая сторона / Правая сторона
00°01'11'' / 00°00'44''
Максимальная погрешность профиля = 0,009 mm
Минимальная погрешность профиля = -0,005 mm
Радиальное биение зубчатого венца = 0,016 mm
Шаг зацепления на секторе №1 = 7,853 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №1 = -0,001 mm
Шаг зацепления на секторе №2 = 7,855 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №2 = 0,001 mm
Шаг зацепления на секторе №3 = 7,861 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №3 = 0,007 mm
Длина общей нормали на секторе №1 = 18,971 mm
Длина общей нормали на секторе №2 = 18,974 mm
Длина общей нормали на секторе №3 = 18,967 mm
Колебание длины общей нормали = 0,007 mm
Смещение исходного контура зуба №1 = 0,148 mm
Смещение исходного контура зуба №2 = 0,137 mm
Смещение исходного контура зуба №3 = 0,136 mm

```

Рисунок 4.20 – Оценка показателей качества четвертого зубчатого колеса из группы

По представленным результатам контроля было установлено, что изменение результатов всех контролируемых показателей качества, полученных при расчете от различных базовых поверхностей, не превышает 3 мкм, результаты контроля в данном случае можно признать достоверными.

Однако, в целях повышения точности контроля зубчатых колес рекомендуется выполнить их многократные измерения. Так, было проведено трехкратное и пятикратное измерение аналогичного зубчатого колеса с исходными данными, указанными выше [101].

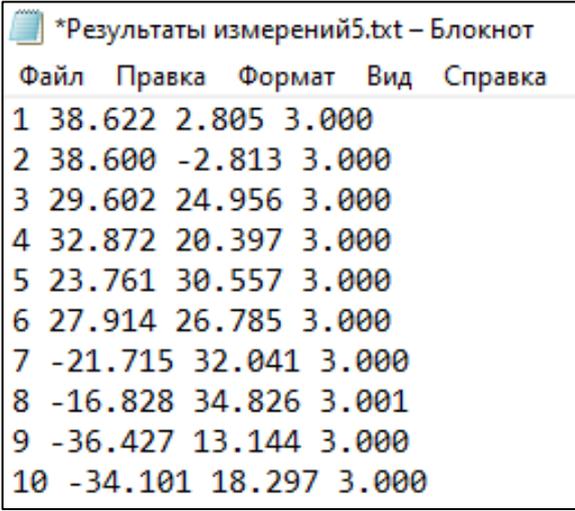
По результатам проведенных измерений в соответствии с алгоритмом программы был произведен расчет средних значений координат (рисунки 4.21 и 4.22 соответственно) точек контрольных сеток боковых поверхностей зубчатого колеса.



*Результаты измерений3.txt – Блокнот

	Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
1	38.625	2.806	3.000		
2	38.601	-2.814	3.000		
3	29.603	24.955	3.000		
4	32.872	20.398	3.000		
5	23.767	30.560	3.000		
6	27.915	26.785	3.000		
7	-21.718	32.044	3.000		
8	-16.829	34.826	3.000		
9	-36.426	13.143	3.000		
10	-34.099	18.296	3.000		

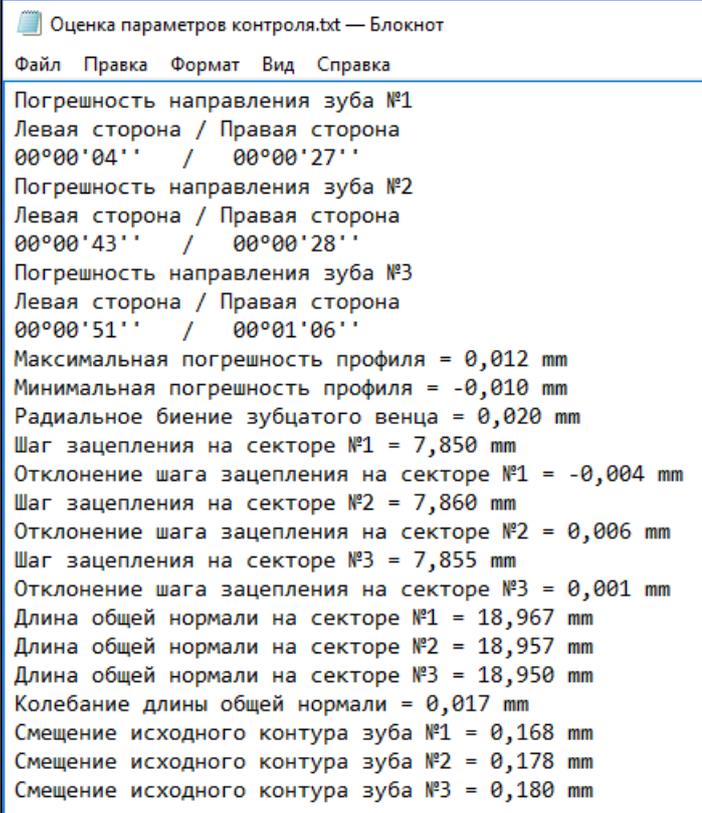
Рисунок 4.21 – Фрагмент массива расчета средних значений координат точек контроля по трехкратным измерениям



	Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
1	38.622	2.805	3.000		
2	38.600	-2.813	3.000		
3	29.602	24.956	3.000		
4	32.872	20.397	3.000		
5	23.761	30.557	3.000		
6	27.914	26.785	3.000		
7	-21.715	32.041	3.000		
8	-16.828	34.826	3.001		
9	-36.427	13.144	3.000		
10	-34.101	18.297	3.000		

Рисунок 4.22 – Фрагмент массива расчета средних значений координат точек контроля по пятикратным измерениям

По полученным данным выполняется оценка показателей качества зубчатого колеса (рисунки 4.23 и 4.24 соответственно).



Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
Погрешность направления зуба №1				
Левая сторона / Правая сторона				
00°00'04'' / 00°00'27''				
Погрешность направления зуба №2				
Левая сторона / Правая сторона				
00°00'43'' / 00°00'28''				
Погрешность направления зуба №3				
Левая сторона / Правая сторона				
00°00'51'' / 00°01'06''				
Максимальная погрешность профиля = 0,012 mm				
Минимальная погрешность профиля = -0,010 mm				
Радиальное биение зубчатого венца = 0,020 mm				
Шаг зацепления на секторе №1 = 7,850 mm				
Отклонение шага зацепления на секторе №1 = -0,004 mm				
Шаг зацепления на секторе №2 = 7,860 mm				
Отклонение шага зацепления на секторе №2 = 0,006 mm				
Шаг зацепления на секторе №3 = 7,855 mm				
Отклонение шага зацепления на секторе №3 = 0,001 mm				
Длина общей нормали на секторе №1 = 18,967 mm				
Длина общей нормали на секторе №2 = 18,957 mm				
Длина общей нормали на секторе №3 = 18,950 mm				
Колесание длины общей нормали = 0,017 mm				
Смещение исходного контура зуба №1 = 0,168 mm				
Смещение исходного контура зуба №2 = 0,178 mm				
Смещение исходного контура зуба №3 = 0,180 mm				

Рисунок 4.23 – Оценка показателей качества зубчатого колеса по данным трехкратных измерений

```

*Оценка параметров контроля.txt – Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
Погрешность направления зуба №1
Левая сторона / Правая сторона
00°00'20'' / 00°00'11''
Погрешность направления зуба №2
Левая сторона / Правая сторона
00°00'30'' / 00°00'48''
Погрешность направления зуба №3
Левая сторона / Правая сторона
00°00'42'' / 00°01'20''
Максимальная погрешность профиля = 0,009 mm
Минимальная погрешность профиля = -0,008 mm
Радиальное биение зубчатого венца = 0,022 mm
Шаг зацепления на секторе №1 = 7,852 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №1 = -0,002 mm
Шаг зацепления на секторе №2 = 7,862 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №2 = 0,008 mm
Шаг зацепления на секторе №3 = 7,857 mm
Отклонение шага зацепления на секторе №3 = 0,003 mm
Длина общей нормали на секторе №1 = 18,961 mm
Длина общей нормали на секторе №2 = 18,967 mm
Длина общей нормали на секторе №3 = 18,968 mm
Колебание длины общей нормали = 0,007 mm
Смещение исходного контура зуба №1 = 0,170 mm
Смещение исходного контура зуба №2 = 0,175 mm
Смещение исходного контура зуба №3 = 0,183 mm

```

Рисунок 4.24 – Оценка показателей качества зубчатого колеса по данным пятикратных измерений

По результатам проведенной оценки показателей качества для данной группы зубчатых колес, было установлено, что изменение результатов 5 из 6 контролируемых показателей качества, не превышает 3 мкм, для показателя, характеризующего отклонение длины общей нормали (F_{uWr}) результат изменился на 5 мкм. Результаты контроля на основе удовлетворительной оценки их воспроизводимости в данном случае можно признать достоверными.

4.4 Выводы по главе 4

1. Для оценки результатов измерений предложена методика сравнений, базирующаяся на оценке угловых положений, начал аппроксимирующих эвольвентных поверхностей.

2. Учитывая расхождение в форматах результатов измерений, представляемых ПО КИМ и оцениваемых по нормативным документам, был разработан алгоритм программы преобразования данных и соответствующее ему ПО – «Программно-вычислительный комплекс контроля геометрических параметров цилиндрических прямозубых немодифицированных зубчатых колес», зарегистрированное в федеральной службе по интеллектуальной собственности, рег. № 2024686365 от 07.11.2024.

3. На основании расчетов, проведенных для апробации программы было установлено, что результаты измерений зубчатого колеса на КИМ с параметрами ($m_n = 2,5$ мм, $Z_K = 30$) практически совпадают с результатами контроля ручными по степени автоматизации средствами измерений по таким параметрам как радиальное биения (f_{rr}) и длина общей нормали (F_{uWr}).

4. При однократном и многократном контроле зубчатых колес, была установлена стабильность результатов измерений для 5 из 6 контролируемых геометрических параметров составило не более 3 мкм, для показателя, характеризующего отклонения длины общей нормали (F_{uWr}) результат изменился на 5 мкм. Измерения зубчатого колеса от различных «базовых» поверхностей показали удовлетворительную стабильность показаний с расхождением результатов не более 3 мкм.

5 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработанное в ходе проведения диссертационного исследования ПО, а также следующие методики и методические инструкции:

1. МИ 01-24 «Алгоритм расчета координат точек контроля боковой поверхности зубчатого колеса»;
2. МИ 02-24 «Алгоритм контроля расположения расчетных координат контрольных точек на боковой поверхности зубчатого колеса»;
3. МВИ 03-24 «Контроль геометрических параметров зубчатых колес с применением универсальных координатно-измерительных машин»;
4. МИ 04-24 «Алгоритм обработки массива координат измеренных точек боковой поверхности зубчатого колеса»;
5. МИ 05-24 «Алгоритм оценки результатов контроля зубчатого колеса», были утверждены отделом главного метролога АО «АК «Туламашзавод» (приложение Б) и приняты к внедрению отделом метрологии АО «Тулаточмаш» (приложение В) и использованы для проведения процедуры выборочного контроля продукции следующих предприятий Тульской области:

1. ООО «Станкотехника», г. Тула;
2. АО «КБП им. академика А. Г. Шипунова», г. Тула;
3. ООО «Сфера», г. Тула.

В процессе работы над диссертационным исследованием, по заказу предприятия ООО «Станкотехника» в 2024 г. был проведен выборочный контроль партии зубчатых колес из 250 шт. по двум выборкам, по 8 колес в каждой. Для контроля были предоставлены зубчатые колеса (рисунок 5.1) со следующими геометрическими характеристиками: $m_n - 2,5$ мм; $Z - 3$; $X - (-0,25)$; $d_a - 78,7$ мм; IT – h12; $E_{Hs} - (-0,09)$ мм; $T_H - 0,12$ мм; $h_3 - 13$ мм.



Рисунок 5.1 – Контролируемая партия зубчатых колес ООО «Станкотехника»

Контроль проводился для уточнения характеристик, установленных при измерении ручным инструментом. По результатам проведенного контроля, для всех зубчатых колес из выборки была установлена стабильность процесса изготовления, т. к. результаты измерений по основным параметрам находились в пределах допуска, в соответствии с требованиями ГОСТ 1643-81 (приложение Г).

Для предприятия ООО «Сфера» был проведен выборочный контроль партии зубчатых колес (рисунок 5.2) в объеме 8 шт. со следующими геометрическими характеристиками: $m_n - 2$ мм; $Z - 30$; $X - 0$; $d_a - 64$ мм; IT – h11; $E_{Hs} - (-0,14)$ мм; $T_H - 0,14$ мм; $h_3 - 10$ мм.



Рисунок 5.2 – Контролируемая партия зубчатых колес ООО «Сфера»

В ходе проведения контроля, для 75 % зубчатых колес от числа выборки была установлена стабильность процесса изготовления, т. к. результаты измерений по основным параметрам находились в пределах допуска, в соответствии с требованиями ГОСТ 1643-81 для зубчатых колес 8 степени точности. Для 25 % контролируемых зубчатых колес было установлено несоответствие значений заявленных характеристик, т. к. значение радиального биения – f_{rr} (47 мкм и 46 мкм) данных колес превышает допустимое значение (45 мкм) по ГОСТ 1643-81 для зубчатых колес 8 степени точности (приложение Д).

Для предприятия АО «КБП им. академика А. Г. Шипунова» был проведен контроль выборки в составе 10 шт. из партии в 120 зубчатых колес (рисунок 5.3), поставляемых по кооперации. На контроль были предоставлены колеса со следующими геометрическими характеристиками: $m_n - 3$ мм; $Z - 34$; $X - 0$; $d_a - 108$ мм; IT – h10; $E_{H5} - (-0,06)$ мм; $T_H - 0,08$ мм; $h_3 - 6$ мм.

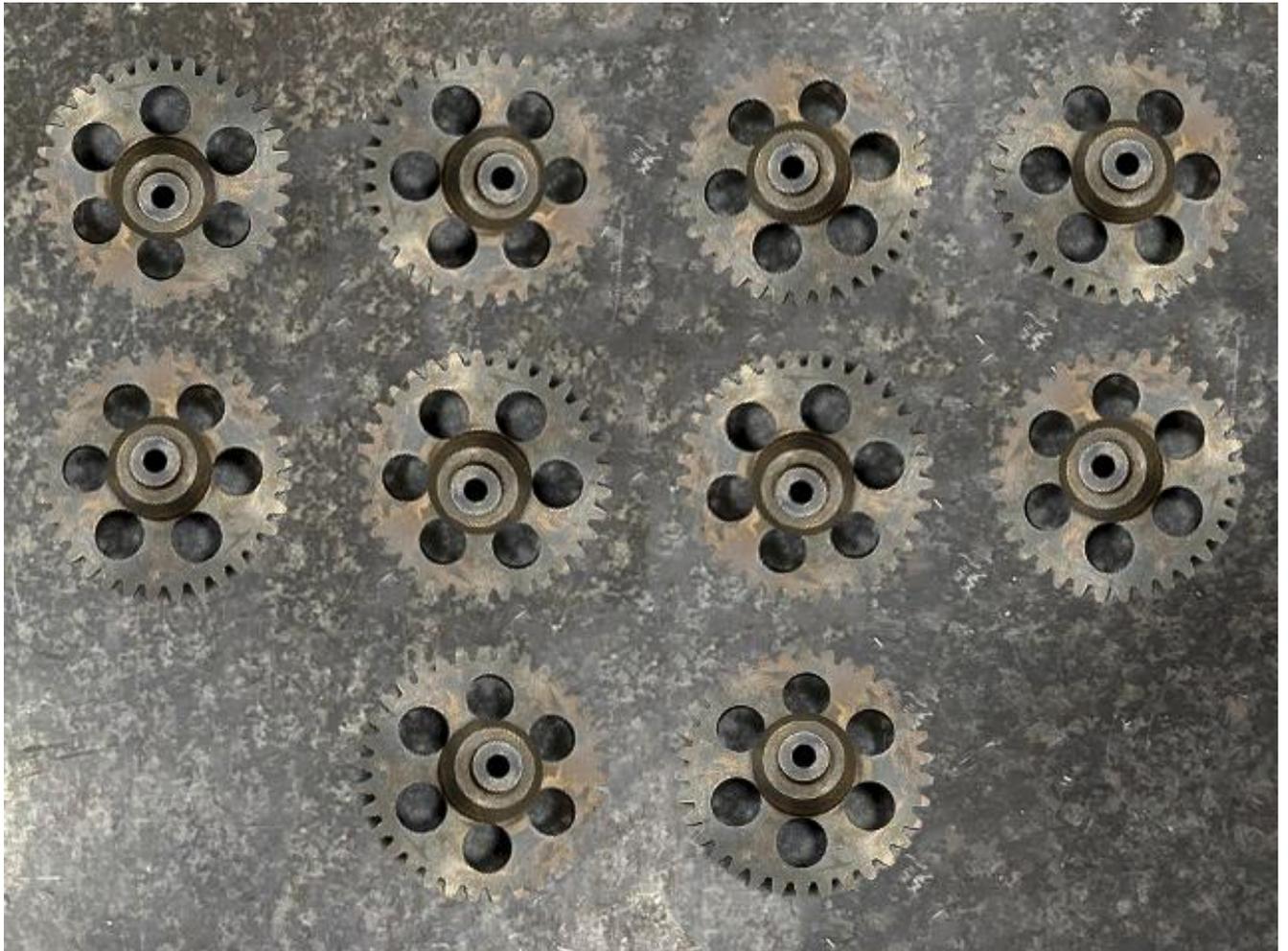


Рисунок 5.3 – Контролируемая партия зубчатых колес АО «КБП им. академика А. Г. Шипунова»

В ходе проведения контроля, для 80% зубчатых колес от числа выборки была установлена стабильность процесса изготовления, т.к. результаты измерений по основным параметрам находились в пределах допуска, в соответствии с требованиями ГОСТ 1643-81 для зубчатых колес 7 степени точности. Для 10% контролируемых зубчатых колес было установлено несоответствие значений заявленных характеристик, т.к. отклонения погрешности профиля – f_{fr} (12 мкм и 14 мкм) данных колес превышают допустимое значение (11 мкм) по ГОСТ 1643-81 для зубчатых колес 7 степени точности (приложение Е).

5.1 Выводы по главе 5

1. Оценка качества представленных сторонними организациями колес показала, что практически все их эксплуатационные показатели находятся в пределах нормативных требований. Отклонения имеют только 4 зубчатых колеса: 2 из партии АО «Сфера» по показателю радиального биения и 2 из партии АО «КБП им. академика А. Г. Шипунова» по показателю погрешности профиля.

2. Результаты контроля позволяют рекомендовать координатный способ оценки показателей качества зубчатых колес разработанным в диссертации методом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная научная задача разработки методики оценки показателей качества зубчатых колес с использованием высоко-интегрированных систем контроля типа универсальных КИМ с целью расширения их эксплуатационных возможностей за счет введения в область их применения операций по оценке показателей качества зубчатых колес. В ходе решения поставленных задач исследования получены следующие основные научно-практические результаты:

1. Проведенный анализ показал, что для оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес возможно применение координатного метода измерений, обеспечивающего достоверные результаты для наиболее широко используемого в промышленности диапазона зубчатых колес с делительным диаметром до 600 мм, модулем больше 1,25 мм и значениями показателей качества в пределах 7(6)-12 степеней точности и реализуемого при применении универсальных КИМ без использования специального и должным образом откалиброванного высоко-точного и дорогостоящего оборудования на базе вычислительных комплексов. При этом установлено, что реализация координатного метода измерений требует разработки необходимого методического и программного инструментария.

2. На основании принятого уровня риска в пределах 1...2,5 % определен необходимый минимальный объем измерений для достоверной оценки показателей качества зубчатых колес на основании формирования контрольной сетки размером не более $4 \times 5 \dots 7 \times 10$ точек контроля, обеспечивающий результативность процесса оценки. Проведенные экспериментальные исследования показали, что возможная погрешность оценки показателей качества зубчатых колес в размере контрольной сетки не превышает 3 мкм, что соответствует собственной погрешности КИМ.

3. Разработана и апробирована методика формирования и проведения оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес на универсальных координатно-измерительных машинах на основе существующих возможностей КИМ в обоснованных размерах контрольной сетки.

4. Для обработки результатов оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес в соответствии с требованиями ГОСТ 1643-81 и ГОСТ ISO 1328-1-2017 было разработано программное обеспечение – «Программно-вычислительный комплекс контроля геометрических параметров цилиндрических прямозубых немодифицированных зубчатых колес», зарегистрированное в федеральной службе по интеллектуальной собственности, рег. № 2024686365 от 07.11.2024.

5. Результаты работы были апробированы при контроле качества колес по заказам предприятий ООО «Станкотехника» (г. Тула), АО «КБП им. академика А. Г. Шипунова» (г. Тула), ООО «Сфера» (г. Тула) и разработанные 5 методических инструкций приняты к исполнению в АО «АК «Туламашзавод» (г. Тула) и АО «Тулочмаш» (г. Тула).

Научные и практические результаты диссертационного исследования рекомендуется применять при решении задач, связанных с оценкой качества прямозубых зубчатых колес на предприятиях машиностроения, а также в учебном процессе подготовки магистров и аспирантов в областях машиностроения и управления качеством и повышении квалификации инженерно-технических работников машиностроительных предприятий.

Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации является расширение зоны использования методик и инструментария процесса оценки качества для изделий с «периодическими выступами» любой формы на универсальных КИМ и доведение его до полной автоматизации с использованием искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абляз Т. Р. Применение координатно-измерительных машин в современном производстве / Т. Р. Абляз, А. А. Васильева // *Master's Journal*. – 2013. – № 1. – С. 9-14.
2. Абрамов, И. В. Методы, средства, системы автоматизации производства и управления качеством : учебное пособие. В 3 частях. Ч. 1. Управление качеством и контроль в машиностроении / И. В. Абрамов, В. П. Иванников, Б. А. Якимович. – Ижевск : ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», 2001. – 176 с.
3. Абрамчук, М. В. Перспектива стандартизации параметров точности зубчатых колес и передач. К разработке нового отечественного стандарта, учитывающего рекомендации ISO / М. В. Абрамчук, Б. П. Тимофеев // *Металлообработка*. – 2013. – № 1. – С. 33-37.
4. Алексеев, В. П. Основы научных исследований и патентоведение : учебное пособие / В. П. Алексеев, Д. В. Озеркин. – Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 172 с.
5. Андриенко, Л.А. Детали машин: учебник для вузов / Л. А. Андриенко ; ред. О. А. Ряховского. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 544 с.
6. Архангельская, М.А. Обработка данных, полученных с помощью координатно-измерительных машин / М. А. Архангельская, П. Николаев. // *САПР и графика*. – 2012. – № 12. – С. 99-101.
7. Борискин, О. И. К вопросу организации контроля в производстве / О. И. Борискин, С. Н. Ларин, Г. А. Нуждин // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2024. – № 1. – С. 294-298.
8. Борисов, В. Б. Справочник технолога-машиностроителя : справочник. В 2 томах. Т. 1 / В. Б. Борисов, Е. Н. Борисов, В. Н. Васильев ; ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – Москва : Машиностроение, 1985. – 655 с.
9. Бурцев, В. М. Технология машиностроения : учебник для вузов / В. М. Бурцев, А. С. Васильев, А. М. Дальский ; ред. А. М. Дальского. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 564 с.

10. Васин, С. А. Обоснование объема контрольных операций на основе статистических методов управления качеством продукции / С. А. Васин, А. А. Маликов, С. М. Никольский // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2025. – № 1.

11. Васин, С. А. Определение необходимого объема измерений при контроле параметров качества зубчатых колес на координатно-измерительной машине / С. А. Васин, А. А. Маликов, С. М. Никольский // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – № 1.

12. Великанов, К. М. Расчеты экономической эффективности новой техники : справочник / К. М. Великанов. – Ленинград : Машиностроение, 1990. – 448 с.

13. Версан, В. Г. Системы управления качеством продукции / В. Г. Версан, И. И. Чайка. – Москва : Изд-во стандартов, 1988. – 102 с.

14. Гапшис, А. А. Координатные измерительные машины и их применение / А. А. Гапшис. – Москва : Машиностроение, 1988. – 328 с.

15. Гинзбург, Е. Г. Зубчатые передачи : справочник / Е. Г. Гинзбург, Н. Ф. Головнов, Н. Б. Фирун ; ред. Е. Г. Гинзбурга. – Ленинград : Машиностроение, 1980. – 415 с.

16. Гинзбург, Е. Г. Производство зубчатых колес / Е. Г. Гинзбург, Н. Т. Халебский. – Ленинград : Машиностроение, 1978. – 136 с.

17. Гинзбург, Е. Г. Типовые технологические процессы изготовления зубчатых передач / Е. Г. Гинзбург, А. В. Шаманин. – Москва : Машиностроение, 1962. – 113 с.

18. Гличев, А. В. Основы управления качеством продукции / А. В. Гличев. – Москва : Изд-во стандартов, 1988. – 80 с.

19. ГОСТ 13755–2015 (ISO 53:1998). Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходные контуры : межгосударственный стандарт : издание официальное : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации по переписке (протокол от 27 августа 2015 года № 79–П) : взамен ГОСТ 1375–81 : дата введения 2017–01–01 / подготовлен ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». – Москва : Стандартиформ.

2016. – 11 с.

20. ГОСТ 1643–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски : государственный стандарт союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 21 апреля 1981 г. №2046 : дата введения 1981–07–01 / разработан Министерством энергетического машиностроения, Министерством высшего и среднего специального образования РСФСР. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам. 1981. – 69 с.

21. ГОСТ 16532–70. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчёт геометрии : государственный стандарт союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 30 декабря 1970 г. №1848 : дата введения 1971–01–01. – Москва : 1983. – 42 с.

22. ГОСТ 8.459–86. Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм с неуказанными допусками : государственный стандарт союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19 июня 1986 г. №1560 : дата введения 1987–01–01 / разработан Министерством высшего и среднего специального образования РСФСР. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам. 1986. – 6 с.

23. ГОСТ 9324–2015. Фрезы червячные цельные чистовые для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем. Технические условия : межгосударственный стандарт : издание официальное : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 29 сентября 2015 г. № 80–П) : взамен ГОСТ 9324–80 : дата введения 2017–01–01 / подготовлен ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ». – Москва : Стандартинформ. 2020. – 40 с.

24. ГОСТ Р ИСО 2859-1–2007. Статистические методы процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 1. Планы выборочного контроля последовательных партий на основе приемлемого уровня качества : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и

внесен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 марта 2007 г. №38–ст : взамен ГОСТ Р 50779.71–99 : дата введения 2007–06–01 / подготовлен ОАО НИЦ КД и Техническим комитетом по стандартизации ТК 125. – Москва : Стандартиформ. 2007. – 100 с.

25. ГОСТ ISO 1328–1–2017. Передачи зубчатые цилиндрические. Система ISO. Классификация допусков на боковые поверхности зубьев. Часть 1. Определения и допускаемые значения отклонений на боковые поверхности зубьев зубчатого колеса : межгосударственный стандарт : издание официальное : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 ноября 2017 г. №52) : введен впервые : дата введения 2020–01–01 / подготовлен ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». – Москва : Стандартиформ. 2018. – 41 с.

26. Грановский, Г. И. Кинематика резания / Г. И. Грановский. – Москва : Машгиз, 1948. – 200 с.

27. Грубин, А. Н. Зуборезный инструмент. В 2 частях. Ч. 1. / А. Н. Грубин, М. Б. Лихциер, М. С. Полоцкий. – Москва : Машгиз, 1947. – 291 с.

28. Гусев, А. А. Технология машиностроения : учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев, Е. Р. Ковальчук, И. М. Колесов. – Москва : Машиностроение, 1986. – 480 с.

29. Дорохов, А. С. Входной контроль качества продукции машиностроения / А. С. Дорохов, В. А. Семейкин. // Сельский механизатор. – 2013. – № 11. – С. 22–23.

30. Женатова, М. Д. Измерения на координатно–измерительных машинах / М. Д. Женатова. // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 3. – С. 31–34.

31. Журавлев, В. А. Технология изготовления глобоидных передач / В. А. Журавлев. – Москва : Машиностроение, 1965. – 152 с.

32. Золотухин, И. С. Контроль геометрических параметров деталей с помощью координатно-измерительных машин / И. С. Золотухин, К. М. Федорова. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2018. – 114 с.

33. Зубарев, Ю. М. Автоматизация координатных измерений: учебное пособие / Ю. М. Зубарев, С. В. Косаревский, Н. Н. Ревин. – Санкт-Петербург : ПИМаш, 2011. – 160 с.

34. Зубарев, Ю. М. Автоматизация координатных измерений в машиностроении : учебное пособие для вузов / Ю. М. Зубарев, С. В. Косаревский. – Санкт-Петербург : 2021. – 154 с.

35. Ильенкова, Н. Д. Управление качеством : учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям / Н. Д. Ильенкова, В. С. Мхитарян, С. Ю. Ягудин ; ред. С. Д. Ильенковой. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «Юнити-Дана», 2003. – 334 с.

36. Искендерзаде, Э. Б. Анализ угловых погрешностей контакта щупа с изделием в координатно-измерительных машинах / Э. Б. Искендерзаде, Ш. В. Ахмедова. // Вестник метролога. – 2023. – № 4. – С. 30-32.

37. Искендерзаде, Э. Б. Исследование температурной погрешности координатно-измерительных машин / Э. Б. Искендерзаде, Ш. В. Ахмедова. // Контроль. Диагностика. – 2023. – № 10. – С. 54-59.

38. Калашников, А. С. Технология изготовления зубчатых колес / А. С. Калашников. – Москва : Машиностроение, 2004. – 480 с.

39. Калашников, С. Н. Изготовление зубчатых колес / С. Н. Калашникова, А. С. Калашников. – Москва : Высш. школа, 1986. – 287 с.

40. Калашников, С. Н. Производство зубчатых колес : справочник / С. Н. Калашников, А. С. Калашников, Г. И. Коган ; ред. Б.А. Тайца. – Москва : Машиностроение, 1990. – 464 с.

41. Кане, М. М. Системы, методы и инструменты менеджмента качества : учебное пособие / М. М. Кане, Б. В. Иванов, В. Н. Корешков, А. Г. Схиртладзе. – Санкт-Петербург : Питер, 2008. – 560 с.

42. Кане, М. М. Управление качеством продукции машиностроения / М. М. Кане, А. Г. Суслов, О. А. Горленко. – Москва : Машиностроение, 2010. – 416 с.

43. Карабонцева, М. В. Автоматизация контроля геометрических характери-

стик червячных и конических зубчатых колес при помощи координатно-измерительных машин / М. В. Карабонцева, Н. В. Брижинская, В. А. Левко // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2024. – № 2. – С. 248-255.

44. Кашуба, Л. А. Алгоритм обработки информации, полученной при измерении реальной геометрии деталей на координатно-измерительных машинах / Л. А. Кашуба // Системный анализ в науке и образовании. – 2011. – № 3. – С. 18-21.

45. Кашуба, Л. А. Геометрия изделий машиностроения / Л. А. Кашуба. // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2012. – № 6. – С. 3-12.

46. Кашуба, Л. А. Разработка системы обработки информации, полученной измерением геометрии изделий с помощью координатно-измерительных машин / Л. А. Кашуба, Е. А. Проходцев // Системный анализ в науке и образовании. – 2013. – № 2. – С. 64-84.

47. Кашуба, Л. А. Реальная геометрия детали / Л. А. Кашуба. // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2012. – № 1. – С. 3-13.

48. Квасников, В. П. Математическая модель погрешности измерения координатно-измерительных машин / В. П. Квасников, Т. М. Хаейн // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. – 2013. – № 4. – С. 25-30.

49. Козлов, Д. Н. Зуборезные работы / Д. Н. Козлов. – Москва : Высшая школа, 1971. – 268 с.

50. Козловский, В. Н. Статистическое управление качеством продукции и сложных процессов / В. Н. Козловский, Г. Л. Юнак, Д. И. Благовещенский, А. Г. Сорокин // Стандарты и качество. – 2021. – № 10. – С. 98-104.

51. Кудряшова, И. А. Координатно-измерительные машины: сравнительный анализ характеристик, рекомендации по применению / И. А. Кудряшова, В. А. Белякова. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 4. – С. 302-307.

52. Кузнецов, В. А., Ялунина Г. В. Основы метрологии / В. А. Кузнецов, Г. В. Ялунина. – Москва : Изд-во стандартов, 1995. – 139 с.

53. Маликов, А. А. Функционально-стоимостной анализ использования КИМ для контроля качества зубчатых колес и обкатного зубообрабатывающего инструмента / А. А. Маликов, С. М. Никольский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 1. – С. 259-263.

54. Марков, Н. Н. Конструкция, расчет и эксплуатация контрольно-измерительных инструментов и приборов / Н. Н. Марков. – Москва : Машиностроение, 2003. – 415 с.

55. Никольский, С. М. Автоматизация производственных процессов за счет внедрения прогрессивной измерительной техники / С. М. Никольский. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 307-312.

56. Никольский, С. М. Алгоритмизация процесса контроля геометрических параметров зубчатого колеса на КИМ / С. М. Никольский, М. В. Ушаков, И. А. Воробьев // Контроль качества продукции. – 2024. – № 10. – С. 52-57.

57. Никольский, С. М. Исследование влияния количества калибровочных точек на результат измерений с применением КИМ / С. М. Никольский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 9. – С. 380-385.

58. Никольский, С. М. Источники погрешностей координатных измерений и способы минимизации их влияния / С. М. Никольский, С. И. Соловьев // Вестник науки. – 2021. – № 6-1. – С. 217-224.

59. Никольский, С. М. К вопросу о многократных измерениях параметров зубчатых колес на КИМ / С. М. Никольский, М. В. Ушаков, И. А. Воробьев, Г. А. Нуждин. // Мир измерений. – 2024. – № 4. – С. 68-74.

60. Никольский, С. М. Методика обработки измерительной информации при контроле геометрических параметров зубчатых колес на КИМ / С. М. Никольский. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 8. – С. 167-173.

61. Никольский, С. М. Особенности различной трактовки результатов изме-

рений, получаемых на КИМ и с помощью ручных средств измерений / С. М. Никольский, С. И. Соловьев // Вестник науки. – 2021. № 6-1. – С. 225-234.

62. Никольский, С. М. Расчет экономической эффективности эксплуатации координатно-измерительной машины / С. М. Никольский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 9. – С. 601-603.

63. Никольский, С. М. Способы создания локальной системы координат при измерениях на КИМ / С. М. Никольский. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 418-420.

64. Никольский, С. М. Экономическая эффективность применения оборудования для автоматизации технологических процессов / С. М. Никольский. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 337-339.

65. Никольский, С. М. Эффективное выполнение контактных измерений на КИМ / С. М. Никольский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 11. – С. 489-491.

66. Нуждин, Г. А. Метрологическое обеспечение инструментального производства / Г. А. Нуждин, М. А. Анисимова, Д. И. Благовещенский // Станкоинструмент. – 2017. – № 4. – С. 58-60.

67. Овумян, Г. Г. Справочник зубореза / Г. Г. Овумян, Я. И. Адам. – Москва : Машиностроение, 1983. – 223 с.

68. Орлов, П. Н. Краткий справочник металлиста / П. Н. Орлов ; ред. П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова. – Москва : Машиностроение, 1986. – 969 с.

69. Печенин, В. А. Модель координатных измерений геометрии поверхностей сложной формы / В. А. Печенин, М. А. Болотов, Н. В. Рузанов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – № 4. – С. 675-685.

70. Полянчикова, М. Ю. Система статистического контроля координатно-измерительной машины / М. Ю. Полянчикова, И. С. Попова, А. А. Кожевникова. // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2022. – № 3 – С. 37-40.

71. Правиков, Ю. М. Измерение цилиндрических зубчатых колес : учебное

пособие к лабораторным работам / Ю. М. Пракивов, Г. Р. Муслина. – Ульяновск : УлГТУ, 2018. – 143 с.

72. Привалов, И. И. Аналитическая геометрия : учебник для вузов / И. И. Привалов. – Санкт-Петербург : Лань, 2005. – 304 с.

73. Программно-вычислительный комплекс контроля геометрических параметров цилиндрических прямозубых немодифицированных зубчатых колес : свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024686365 / Ушаков М.В., Воробьев И.А., Никльский С.М.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». – Заявка № 2024685704; дата поступления 01.11.2024; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 07.11.2025. Бюл. № 11.

74. Протасьев, В. Б. Общие принципы контроля деталей и режущих инструментов на тактильных координатно-измерительных машинах / В. Б. Протасьев, И. А. Воробьев, Д. И. Благовещенский, Е. В. Плахотникова. – Тула : Тульский государственный университет, 2017. – 131 с.

75. Рабинович, С. Г. Погрешности измерений / С. Г. Рабинович. – Санкт-Петербург : Энергия, 2008. – 261 с.

76. Романов, В. Ф. Расчеты зуборезных инструментов / В. Ф. Романов. – Москва : Машиностроение, 1969. – 251 с.

77. Семенова, Е. И. Управление качеством : учебник для студентов высших учебных заведений / Е. И. Семенова, В. Д. Коротнев, А. В. Пошатаев ; ред. Е. И. Семеновой. – Москва : КолосС, 2003. – 184 с.

78. Семенченко, И. И. Проектирование металлорежущих инструментов / И. И. Семенченко, В. М. Матюшин, Г. Н. Сахаров. – Москва : Машгиз, 1963. – 955 с.

79. Сильвестров, Б. Н. Справочник молодого зуборезчика / Б. Н. Сильвестров – Москва : Высшая школа, 1981. – 198 с.

80. Скороходова, Е. А. Справочник технолога прибориста / Е. А. Скороходова. – Москва : Машиностроение, 1980. – 463 с.

81. Сурков, И. В. Автоматизация контроля параметров зубчатых колёс и передач / И. В. Сурков // Станкоинструмент. – 2016. – № 1. – С. 80-87.

82. Сурков, И. В. Координатные измерения линейно–угловых параметров зубчатых колес / И. В. Сурков, М. В. Мягкова // Оборудование и инструмент. Металлообработка. 2007. – №6. – С. 2-6.

83. Сурков И. В. Разработка математического обеспечения для размерно-точностного анализа результатов координатных измерений / И. В. Сурков, А. И. Буртовая // Прогрессивные технологии в машиностроении : сборник научных трудов Издательский центр ЮУрГУ. – Челябинск, 2012. – С. 101-104.

84. Сурков, И. В. Современные средства контроля линейно–угловых параметров зубчатых колес / И. В. Сурков, М. В. Мягкова // Оборудование и инструмент. Металлообработка. – 2007. – № 4. – С. 48-51.

85. Тайц, Б.А. Точность и контроль зубчатых колес / Б. А. Тайц. – Москва : Машиностроение, 1972. – 372 с.

86. Тигнибидин, А. В. Определение достоверных методик проведения измерений на координатно-измерительных машинах / А. В. Тигнибидин, Л. В. Зайнуллина, В. А. Ромащенко. // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – № 1. – С. 185-191.

87. Тимотин, А. М. Применение координатно-измерительных машин (КИМ) на современном производстве как способ повышения эффективности контроля качества выпускаемой продукции / А. М. Тимотин // Системы компьютерной математики и их приложения. – 2024. – № 25. – С. 37-40.

88. Тимофеев, Б. П. Комбинирование норм точности в стандартах зубчатых передач / Б. П. Тимофеев, Д. В. Новиков // Стандарты и качество. – 2013. – № 5. – С. 48-52.

89. Тимофеев, Б. П. Сравнение табличных значений параметров точности зубчатых колес и передач в стандартах: ISO 1328 и ГОСТ 1643–81 / Б. П. Тимофеев, М. В. Абрамчук // Теория механизмов и машин. – 2007. – № 1. – С. 60-70.

90. Трошин, А. А. Методы фильтрации при измерении на координатно-измерительных машинах / А. А. Трошин, О. В. Захаров // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2020. – № 1. – С. 59-67.

91. Ушаков, М. В. Алгоритмизация процесса обработки измерительной информации при контроле зубчатых колёс на координатно-измерительных машинах / М. В. Ушаков, И. А. Воробьев, С. М. Никольский // Альманах современной метрологии. – 2022. – № 3. – С. 154-159.

92. Ушаков, М. В. Анализ возможностей существующего программного обеспечения КИМ / М. В. Ушаков, И. А. Воробьев, С. М. Никольский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 10. – С. 506-510.

93. Ушаков, М. В. Возможности использования метода координатного контроля для оценки качества изготовления зубчатых колес / М. В. Ушаков, И. А. Воробьев, С. М. Никольский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 1.

94. Ушаков М. В. Особенности использования программного обеспечения для оценки результатов контроля зубчатых колес / М. В. Ушаков, И. А. Воробьев // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства: технология и надежность машин, приборов и оборудования : XIV международная науч.-техн. конф. 10 дек. 2019 г. – Вологда, 2020. – С. 105-109.

95. Ушаков, М. В. Оценка области использования КИМ / М. В. Ушаков, И. А. Воробьев // Мир измерений. – 2022. – № 2. – С. 49-51.

96. Ушаков, М. В. Рекомендации по разработке методики контроля зубчатых колес на КИМ / М. В. Ушаков, И. А. Воробьев, С. М. Никольский // Контроль. Диагностика. – 2022. – № 9. – С. 46-51.

97. Ушаков, М. В. Рекомендации по разработке методики обработки результатов измерения зубчатых колес на КИМ / М. В. Ушаков, И. А. Воробьев, С. М. Никольский // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2023. – № 11. – С. 519-523.

98. Ушаков М. В. Стратегия измерений зубчатых колес с применением координатно-измерительной машины / М. В. Ушаков, И. А. Воробьев, С. М. Никольский // Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения : международная науч.-практ. конф. 16-18 мая 2024 г. – Ижевск, 2024. – С. 158-166.

99. Ушаков, М. В. Стратегия контроля параметров зубчатых колес на КИМ / М. В. Ушаков, И. А. Воробьев, С. М. Никольский // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2024. – № 2. – С. 177-181.
100. Федюкин, В. К. Управление качеством производственных процессов : учебное пособие для вузов / В. К. Федюкин. – Москва : КноРус, 2016. – 230 с.
101. Фейгенбаум, А. В. Контроль качества продукции / А. В. Фейгенбаум. – Москва : Экономика, 1986. – 470 с.
102. Чекмарев, А. Н. Статистические методы управления качеством / А. Н. Чекмарев, В. А. Барвинок, В. В. Шалавин. – Москва : Машиностроение, 1999. – 319 с.
103. Шишкин, И. Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством : учебник для вузов / И. Ф. Шишкин. – Москва : Издательство стандартов, 1990. – 342 с.
104. Якимов А. В. Качество изготовления зубчатых колес / А. В. Якимов, Л. П. Смирнов, Ю. А. Боршинов. – Москва : Машиностроение, 1979. – 191 с.
105. ISO/TR 10064–1:2019 Code of inspection practice. Part 1: Measurement of cylindrical gear tooth flanks. 2019. – 14 p.
106. Kong, W. A novel method to improve on-machine measurement accuracy for face gear tooth flank deviation / W. Kong, J. Dong, Y. Xiao, J. Zhou, S. Wang, Y. Zhao, M. Xia // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2024. – № 128. – P. 19-40.
107. Lin, Hu. Influence and compensation of CMM geometric errors on 3D gear measurements / H. Lin, F. Keller, M. Stein // *Measurement*. – 2020. – № 151. – P. 107-110.
108. Zelený, V. Mathematical approach to evaluate involute gear profile and helix deviations without using special gear software / V. Zelený, I. Linkeová, J. Sýkora, P. Skalník // *Mechanism and Machine Theory*. – 2019. – № 135. – P. 150-164.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024686365

**Программно-вычислительный комплекс контроля
геометрических параметров цилиндрических
прямозубых немодифицированных зубчатых колес**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет» (RU)*

Авторы: *Ушаков Михаил Витальевич (RU), Воробьев Илья
Александрович (RU), Никольский Сергей Михайлович
(RU)*



Заявка № 2024685704

Дата поступления 01 ноября 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 07 ноября 2024 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e7e1a6300b154f2401670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

АО «АК «Туламашзавод»

РАСПОРЯЖЕНИЕ по ОГМетр

№501-160 от 22.11.2024

О принятии к внедрению
методических инструкций в ОГМетр

На основании представленных Тульским государственным университетом рекомендаций по проведению контроля зубчатых колес с применением координатно-измерительных машин, в соответствии с которыми был разработан комплект методических инструкций (МИ 01-24, МИ 02-24, МВИ 03-24, МИ 04-24, МИ 05-24)

ПРЕДЛАГАЮ:

1. Утвердить положения комплекта методических инструкций и разрешить его применение на территории АО «АК «Туламашзавод» для проведения оценки показателей качества зубчатых колес;
2. Ответственным за обеспечение единства измерений и персоналу лаборатории КИМ изучить и руководствоваться в работе требованиями данного комплекта методических инструкций;
3. Контроль и организацию исполнения данного распоряжения возложить на заместителей главного метролога и начальника лаборатории КИМ.

Главный метролог



О.В. Хромов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Форма по КПУД 7109-18
ГОСТ Р 7.0.97-2016



Акционерное общество «Тулаточмаш»
АО «ТУЛАТОЧМАШ»

Коминтерна ул., д. 24., Тула, 300041
Телефон: (4872) 32-92-70. Факс: (4872) 30-93-23, 32-93-23.
<http://tulatochmash.ru> E-mail: info@tulatochmash.ru
ОКПО 07540142, ОГРН 1027100738565, ИНН/КПП 7106002829/710601001

УТВЕРЖДАЮ

Главный метролог АО «Тулаточмаш»

А. А. Литвинова



20.12.2015 г.

Акт

о принятии к внедрению результатов научно-исследовательской работы

Настоящий акт составлен о том, что результаты научно-исследовательской работы ТулГУ «Координатный контроль параметров качества цилиндрических прямозубых зубчатых колес на универсальных КИМ» в виде комплекта методических инструкций для проведения контроля, разработанных в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и апробированного в ОГ метролога АО «АК «Туламашзавод», приняты для внедрения в АО «Тулаточмаш».

Исполнители: аспирант ТулГУ Никольский С.М.

Внедрение комплекта методических инструкций позволит, при наличии координатно-измерительной машины, обеспечить сокращение затрат на подготовку производства за счет отказа от покупки специализированного оборудования, сопутствующей оснастки и программного обеспечения для контроля зубчатых колес.

Ориентировочный годовой экономический эффект от внедрения результатов работы в АО «Тулаточмаш» будет зависеть от стоимости конкретного типа измерительного оборудования, предполагавшегося к закупке.

Ведущий инженер-метролог

А. А. Кузнецов

Инженер-метролог I категории

Ю. Г. Апполонова

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
АКЦИОНЕРНАЯ КОМПАНИЯ
«ТУЛАМАШЗАВОД»**

Мосина ул., д. 2, Тула, 300002 Теле-
граф 253181, Тула, Прибор Тел/факс
(4872) 50- 51- 89
E-mail sekretar@tulamash.ru
www.tulamash.ru
ОКПО 07514340 ОГРН1027100507114
ИНН/КПП 7106002836/785050001

11.12 . 2024 г. № 501- 2299

АКТ

**о проведении выборочного контроля группы зубчатых колес из партии в
объеме 250 шт., предоставленных ООО «Станкотехника» в отдел главного
метролога АО «АК «Туламашзавод»**

Мы, нижеподписавшиеся, удостоверяем, что в отдел главного метролога АО «АК «Туламашзавод» была предоставлена группа зубчатых колес – 077 110 129 Шестерня, согласно тендерному описанию, соответствующая 8-й степени точности, из партии в объеме 250 шт., для проведения процедуры выборочного контроля качества их геометрических параметров, согласно требованиям ГОСТ 1643-81.

Контроль геометрических параметров данных зубчатых колес проводился с использованием координатно-измерительной машины фирмы Coord3, модели ARES 10.7.5, обладающей заявленной погрешностью измерений ± 3 мкм, с применением следующего комплекта методических инструкций и методики выполнения измерений: МИ 01-24, МИ 02-24, МВИ 03-24, МИ 04-24, МИ 05-24, утвержденных отделом главного метролога АО «АК «Туламашзавод».

Результаты контроля представлены в виде отдельных протоколов, в количестве 16 штук.

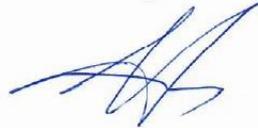
По полученным результатам измерений, было установлено, что все измеренные зубчатые колеса соответствуют своим заявленным характеристикам, в частности соответствуют 8-й степени точности по ГОСТ 1643-81.


Главный метролог
АО «АК «Туламашзавод»

Главный технолог
ООО «Станкотехника»



О.В. Хромов



Е.А. Фильков

ПРИЛОЖЕНИЕ Д**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
АКЦИОНЕРНАЯ КОМПАНИЯ
“ТУЛАМАШЗАВОД”**

Мосина ул.д. 2, Тула, 300002 Теле-
граф 253181, Тула, Прибор Тел./факс
(4872) 50- 51- 89
E-mail sekretar@tulamash.ru
www.tulamash.ru
ОКПО 07514340 ОГРН1027100507114
ИНН/КПП 7106002836/785050001

05-12 2024 г. № 501- 2280

АКТ**выполнения работ****по проведению выборочного контроля группы зубчатых колес**

Мы, нижеподписавшиеся: главный метролог АО «АК «Туламашзавод» О.В. Хромов и директор ООО «Сфера» Никифоров А.П., удостоверяем, что согласно договоренности 04.12.2024 в отдел главного метролога АО «АК «Туламашзавод», была предоставлена группа зубчатых колес в объеме 10 штук, являющейся выборкой из партии 100 штук, поставленной по кооперации предприятием подрядчиком, для проведения контроля параметров представленной партии изделий.

Согласно техническому описанию (см. чертеж 01.03.07.015) данные колеса являются цилиндрическими, прямозубыми некоррегированными модуля 2 мм, числом зубьев 30 и высотой зуба 10 мм. Точность изготовления должна соответствовать степени – 8В согласно требованиям ГОСТ 1643-81.

Контроль геометрических параметров данных зубчатых колес проводился с использованием координатно-измерительной машины фирмы Coord3, модели ARES 10.7.5, обладающей заявленной погрешностью измерений ± 3 мкм, с применением следующего комплекта методических инструкций и методики выполнения измерений: МИ 01-24, МИ 02-24, МВИ 03-24, МИ 04-24, МИ 05-24, утвержденных отделом главного метролога АО «АК «Туламашзавод».

Результаты контроля представлены в виде отдельных протоколов, в количестве 8 штук (см. приложение).

По полученным результатам измерений, было установлено, что 6 из 8 измеренных зубчатые колеса соответствуют своим заявленным характеристикам, в частности соответствуют 8-й степени точности по ГОСТ 1643-81.

Зубчатые колеса № 3 и 8 не соответствуют своим заявленным характеристикам, т.к. радиальное биение (f_r) данных колес превышают допустимое значение по ГОСТ 1643-81.

Работу выполнил:

Главный метролог
АО «АК «Туламашзавод»



О.В. Хромов

Правильность выполнения работ подтверждаю:

Директор
ООО «Сфера»



Никифоров А.П.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
АКЦИОНЕРНАЯ КОМПАНИЯ
“ТУЛАМАШЗАВОД”**

Мосина ул., д. 2, Тула, 300002 Теле-
граф 253181, Тула, Прибор Тел/факс
(4872) 50- 51- 89
E-mail sekretar@tulamash.ru
www.tulamash.ru
ОКПО 07514340 ОГРН1027100507114
ИНН/КПП 7106002836/785050001

02.12, 2024 г. № 501- 2271

АКТ**выполнения работ****по проведению выборочного контроля группы зубчатых колес**

Мы, нижеподписавшиеся: главный метролог АО «АК «Туламашзавод» Хромов Олег Витальевич и и.о. главного метролога АО «КБП» Милованов Алексей Федорович, удостоверяем, что согласно договоренности 28. 11. 2024 г в отдел главного метролога АО «АК «Туламашзавод», была предоставлена группа зубчатых колес в объеме 10 штук, являющейся выборкой из партии 120 штук, поставленной по кооперации предприятием подрядчиком, для проведения контроля параметров представленной партии изделий.

Согласно техническому описанию (см. чертеж 51 333 21 784) данные колеса являются цилиндрическими, прямозубыми некоррегированными модуля 3 мм, числом зубьев 34 и высотой зуба 6 мм. Точность изготовления должна соответствовать степени – 7D согласно требованиям ГОСТ 1643-81.

Контроль геометрических параметров данных зубчатых колес проводился с использованием координатно-измерительной машины фирмы Coord3, модели ARES 10.7.5, обладающей заявленной погрешностью измерений ± 3 мкм, с при-

менением следующего комплекта методических инструкций и методики выполнения измерений: МИ 01-24, МИ 02-24, МВИ 03-24, МИ 04-24, МИ 05-24, утвержденных отделом главного метролога АО «АК «Туламашзавод».

Результаты контроля представлены в виде отдельных протоколов, в количестве 10 штук (см. приложение).

По полученным результатам измерений, было установлено, что 8 из 10 измеренных зубчатые колеса соответствуют своим заявленным характеристикам, в частности соответствуют 7-й степени точности по ГОСТ 1643-81.

Зубчатые колеса № 1 и 2 не соответствуют своим заявленным характеристикам, т.к. погрешность профиля (f_f) данных колес превышают допустимое значение по ГОСТ 1643-81.

Работу выполнил:
Главный метролог
АО «АК «Туламашзавод»



О.В. Хромов

Правильность выполнения работ
подтверждаю:

И.о. главного метролога
АО «КБП»

А.Ф. Милованов