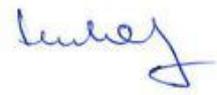


На правах рукописи



НИКОЛЬСКИЙ Сергей Михайлович

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

Специальность 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.
Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Маликов Андрей Андреевич

Официальные оппоненты: **Димитров Валерий Петрович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет», г. Ростов-на-Дону,
заведующий кафедрой

Антипова Ольга Игоревна
кандидат технических наук,
директор ООО «Школа мастеров», г. Тольятти

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится 17 июня 2025 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.417.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, ауд. 9 - 101

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:

<https://tulsu.ru/science/dissertation/diss-24-2-417-06/nikolskiy-sm-24-2-417-06>

Автореферат разослан «18» апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Литвинова Ирина Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 метода 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 высокоинтегрированных 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 КИМ.

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 КИМ;
- 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 КИМ 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 КИМ, 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 КИМ на основе расширения их эксплуатационных возможностей, которые углубляют и конкретизируют область применения 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 КИМ.

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 «Туламашзавод», 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 КИМ 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» (г. Тула, 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 КИМ 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 КИМ 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: [1] – определение размера сетки контрольных точек; [2] – оценка воспроизводимости результатов измерений; [3] – расчет эффективности процесса оценки показателей качества зубчатых колес; [4] – разработка структуры процесса оценки показателей; [5] – обзор преимуществ и недостатков современного программного обеспечения КИМ; [6] – расчет числа резцов и величины шага между резами; [7] – разработка методики процесса оценки показателей качества колес на универсальной КИМ; [8] – разработка порядка проведения этапов процесса оценки показателей качества прямозубых зубчатых колес; [9] – определение фонда времени; [10] – разработка основных зависимостей для расчета параметров норм плавности и кинематической точности зубчатого колеса; [11] – разработка программы проведения оценки показателей качества зубчатых колес на КИМ.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность избранной темы, степень ее разработанности, цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе представлены обзор и анализ исследований, посвященных проблеме оценки показателей качества зубчатых колес, определена цель работы и сформулированы задачи исследования.

Показано, что зубчатые колеса находят широкое применение в составе изделий как общепромышленного, так и специального назначения. Причем качество зубчатых колес зачастую оказывает самое непосредственное влияние как на качество изделия, так и на качество выполнения им своего функционального назначения. Поэтому как к качеству изготовления зубчатых колес, так и к качеству оценки их параметров предъявляются повышенные требования, установленные в

соответствующих нормативных документах. Отмечено, что, хотя имеется соответствующее специализированное оборудование для оценки показателей качества зубчатых колес в условиях массового, крупно- и среднесерийного производства, проведение такой оценки в условиях ремонтного, опытного, единичного и мелкосерийного производства связано с большими затратами различного вида ресурсов. Данные обстоятельства, актуальность которых особенно возросла в современных условиях беспрецедентного санкционного давления и проведения специальной военной операции, когда требуется снижение временных затрат на опытное производство новой техники, обуславливают необходимость создания соответствующего инструментария оценки качества зубчатых колес, в том числе с использованием возможностей универсальных КИМ.

Приведены сведения о параметрах, наиболее широко используемого в составе изделий общепромышленного и специального назначения ассортимента зубчатых колес: нормальный модуль – 1,25...6 мм; число зубьев – 20...100; угол исходного контура – 20°; высота зуба – 0...60 мм. Показано, что показатели качества зубчатых колес для обеспечения выполнения изделием своего функционального назначения должны находиться в пределах 7-12 степеней точности согласно ГОСТ 1643-81. Установлены следующие основные 6 показателей, в совокупности достаточных для определения качества прямозубых зубчатых колес: радиальное биение зубчатого венца; колебание длины общей нормали; отклонение шага зацепления; погрешность профиля зуба; погрешность направления зуба; фактическое наименьшее дополнительное смещение исходного контура.

Рассмотрены основные методы и средства оценки показателей качества изготовления зубчатых колес, в том числе одно из наиболее распространенных средств измерений – координатно-измерительные машины. Проведен анализ, подтверждающий достаточность показателей точности универсальных КИМ для оценки наиболее используемого диапазона значений выделенных 6 основных показателей качества прямозубых зубчатых колес.

На основании вышеизложенного определена цель работы и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе обоснована возможность использования координатного метода для оценки показателей качества зубчатых колес и разработана стратегия оценки показателей качества боковых поверхностей зубьев.

Применяя стратегию оценки показателей качества зубчатых колес, рекомендованную ГОСТ ISO 1328-1–2017, большие участки зуба остаются неохваченными, при этом объем измерений очень значителен (не менее 150 замеров на 1 мм длины траектории обката) и требует специальной системы обработки. В тоже время, процессы механической обработки различных поверхностей являются стабильными во времени, а образуемые при этом погрешности регулярными. Это позволяет провести достаточно точную аппроксимацию реальной боковой поверхности зуба колеса поверхностями второго порядка с определением их отклонений от заданных.

Совокупность несоответствий боковых поверхностей зубьев зубчатых колес условно можно разделить на 3 группы: низкочастотные; среднечастотные;

высокочастотные. Учитывая их регулярность, поверхности, содержащие низкочастотные и среднечастотные несоответствия, могут быть описаны поверхностями второго порядка. В работе доказано, что для определения параметров таких поверхностей необходимо провести замеры не менее чем в 17 узлах контрольной сетки (рисунок 1).

Высокочастотные несоответствия при обработке зубьев зубчатых колес в поперечном сечении являются следствием пересечения следов различных резов, а в продольном – величиной осевой подачи инструмента и образуют сетку регулярных выступов на боковой поверхности зуба. Размеры высокочастотных несоответствий малы ввиду значительного числа резов (22...29) и малой осевой подачи при чистовой обработке (0,8...1 мм/об) и в большинстве случаев не оцениваются при контроле, так как перепад высот выступов в зоне $0,2 \times 0,2$ мм не превысит 0,0016 мм. При необходимости оценки высокочастотных несоответствий суммарное количество контрольных точек составит не более 30, а для крупномодульных зубчатых колес – не более 70.

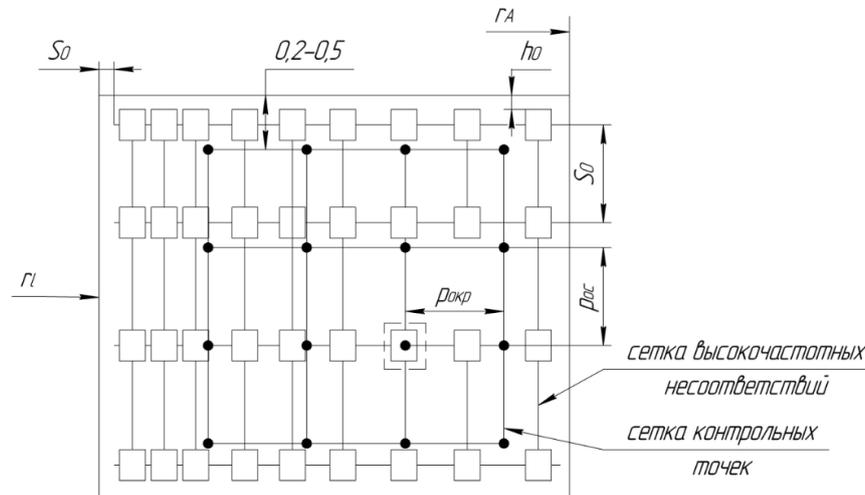


Рисунок 1 – Формы сеток несоответствий и контрольных точек

Показано, что представляя боковую поверхность зуба как генеральную совокупность элементарных площадок $0,4 \times 0,4$ мм и ориентируясь на рекомендации одноступенчатого выборочного контроля при риске AQL в пределах 1...2,5 %, для оценки показателей качества зубчатых колес достаточно проведения замеров по контрольной сетке $4 \times 5 \dots 7 \times 10$ точек.

Установлено, что для достаточной достоверности контроль геометрических параметров зубьев следует проводить не менее чем на 3 зубьях, расположенных в различных зонах зубчатого венца. Равномерное (через 120°) их расположение рационально для определения кинематических погрешностей. Однако для определения радиального биения необходимо как минимум 4 точки измерения. Контроль длины общей нормали предполагает измерение пары соседних зубьев, либо лежащих через 3...4 зуба также как минимум в трех разных зонах, что в сумме требует контроля не менее 6 зубьев. То же самое относится и к контролю погрешностей шага зацепления.

Все вышперечисленное делает необходимым проведение оценки 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.

Координаты точек контрольной сетки для одной впадины зубчатого колеса предложено определять по зависимости:

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

где $t_i = \pm \left[\frac{\pi}{2 Z_K} - inv\alpha_n - 2 \left(\chi m_n + E_S - \frac{T_n}{2} \right) tg\alpha_n / (m_n Z_K) + inv\alpha_i \right],$
 $\cos \alpha_i = \frac{r_b}{r_i}, r_i = r_{min} + \frac{r_{max} - r_{min}}{m - 1} (i - 1);$

i и j – количество точек сетки,

$Z_K, \alpha_n, \chi, m_n, E_S, T_n$ – параметры колеса по ГОСТ 1643-81.

Расчет параметров точек сетки на других k впадинах производится путем поворота системы координат на угол $\varphi_k = \frac{2\pi}{Z_K} (k - 1)$.

Дополнительно в базовой плоскости XOY при $r_k = r_e + 1$ мм рассчитываются координаты опорных точек, соответствующих серединам впадин. Результаты расчетов координат контрольных и опорных точек записываются в соответствующий файл ПЭВМ.

Третья глава посвящена разработке методики формирования и проведения оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес на универсальных КИМ.

При проведении оценки показателей качества исследуемое колесо устанавливается на столе КИМ так, чтобы одна из торцовых поверхностей была бы параллельна плоскости стола (рисунок 2). Крепление колеса и элементов производится с помощью технической мастики. В программном обеспечении (ПО) КИМ выбирается опция «Измерить геометрический элемент» и путем измерения 3-4-х точек верхней плоскости, а также 4...6-ти точек в двух сечениях посадочного отверстия определяется положение оси Z локальной системы координат (рисунок 3).



Рисунок 2 – Расположение зубчатого колеса на измерительном столе

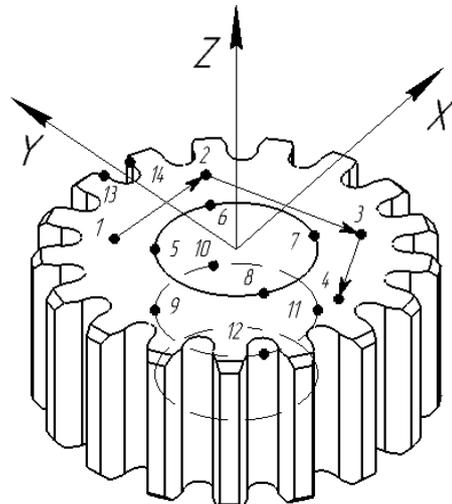


Рисунок 3 – Схема измерений базовых элементов колеса

Выбирается исходная впадина, в которую вводится наконечник датчика и измеряются 2 точки, лежащие на противоположных сторонах впадины примерно на одном радиусе (рисунок 4, а). По точке со средним значением координат измеренных точек будет проходить ось Y локальной системы координат. Получаемая при этом погрешность будет в дальнейшем компенсирована расчетом в итоговой программе при обработке результатов измерений.

Операцией ПО КИМ «Импорт данных» вводится полученный ранее файл с координатами контрольных и опорных точек. Далее производятся измерения параметров зубчатого колеса в следующем порядке:

- щуп измерительной головки перемещается в первую опорную точку $k = 1$;
- включается опция «Измерить геометрический элемент» и щуп смещается по вертикали до уровня Z_1 и производит замеры по всем точкам (рисунок 4, б) левой стороны впадины по порядку номеров точек контрольного файла;

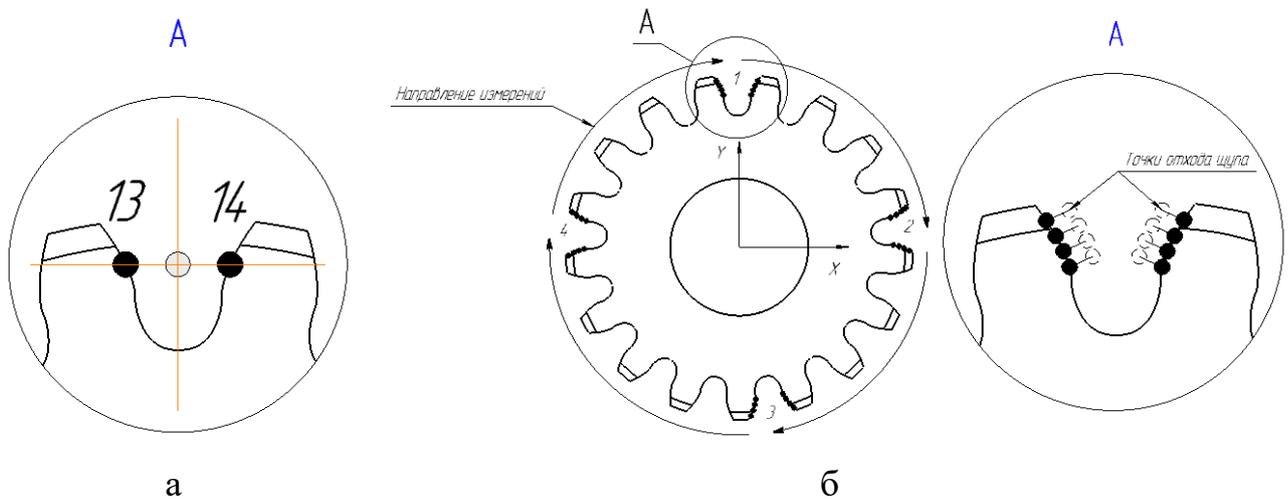


Рисунок 4 – Измерение координат точек для формирования оси Y
 а – определение центра исходной впадины, б – схема проведения замеров по контрольным впадинам

- по окончании контроля щуп отводится в положение первой опорной точки первого уровня;
- в такой же последовательности производятся замеры точек контрольной сетки правой стороны впадины и щуп возвращается в опорную точку;
- используя команду «Запись программы» последовательность действий записывается как отдельная программа;
- щуп перемещается на уровень ниже (Z_2) и замеры повторяются по записанной программе;
- измерения повторяются по всем уровням до последнего, результаты контроля последовательно записываются в файл результатов измерений;



Рисунок 5 – Процесс измерения зубчатого колеса

- щуп измерительной головки отводится на уровень Z_0 и все процедуры записываются также отдельной программой;
- щуп переводится в положение второй опорной точки $k = 2$ на уровне $Z_0 = -1$ мм, контроль и запись результатов измерений повторяются;
- подобная процедура проводится по всем впадинам зубьев колеса, по которым необходимо провести измерения (рисунок 5);
- полная траектория измерений записывается в отдельный файл.

По окончании проведения всех необходимых замеров в ПО КИМ формируется документ формата «.txt», содержащий в себе координаты измеренных точек, а траектория движения щупа измерительной головки фиксируется в отдельной программе управления.

При необходимости многократных измерений производятся повторные замеры по зафиксированной управляющей программе с записью результатов в отдельные файлы.

Проведенные многократные повторные измерения показали, что разница результатов измерений находится в пределах 4...5 мкм.

Четвертая глава посвящена 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.

Основной операцией расчета является аппроксимация координат измеренных точек боковой поверхности зуба колеса эвольвентой основного цилиндра ($R_b = 0,5 \pi m_n \cos \alpha$) в каждом сечении с одновременным определением отклонений f_{fr} . Аппроксимация производится заданием угла начала эвольвенты на основном цилиндре – μ_{jk} . Для каждой точки уровня рассчитываются параметры и отклонения положений контрольных точек от эвольвенты (рисунок 6):

$$\varphi_{ijk} = \frac{X_{ijk}}{Y_{ijk}}, r_{ijk} = \sqrt{X_{ijk}^2 + Y_{ijk}^2}, l_{ijk} = \sqrt{r_{ijk}^2 - R_b^2};$$

$$\cos t_{ijk} = \frac{R_b}{r_{ijk}}, q_{ijk} = \varphi_{ijk} + t_{ijk};$$

$$u_{ijk} = R_b (q_{ijk} - \mu_{jk}), f_{frijk} = l_{ijk} - u_{ijk}.$$

Изменяя μ_{jk} , добиваются чтобы:

$$\sum_{i=1}^n f_{frijk}^2 \rightarrow \min.$$

Расчет производится для каждого сечения левой и правой сторон впадины для 9 зубьев (см. главу 2).

Для первой впадины для левой и правой сторон из значений μ_{jL1} и μ_{jR1} методом наименьших квадратов выбирают средние значения начал эвольвент μ_{jL1} и μ_{jR1} относительно направляющей, параллельной оси. Далее определяют угол положения середины впадины в принятой локальной системе координат, полученный из-за неточности определения положения оси Y в момент установки:

$$\Delta\mu = \frac{\mu_{R1} + \mu_{L1}}{2}$$

и пересчитывают координаты контрольных X_{ijk}, Y_{ijk} и углы начал эвольвент.

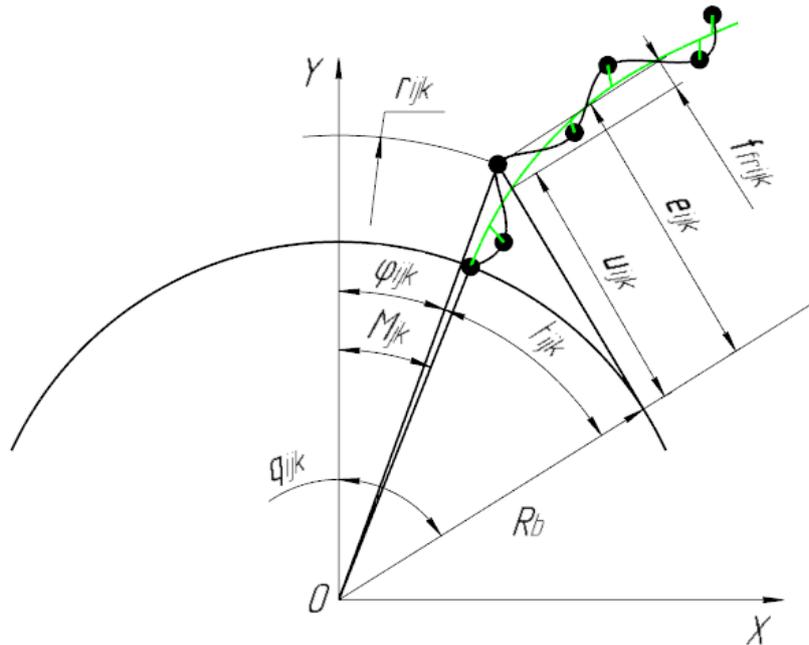


Рисунок 6 – Схема расчета погрешности профиля

Для каждой стороны впадины задаются винтовой направляющей на основном цилиндре, положение которой под углом α_ϕ определяют оценкой отклонений начал эвольвент методом наименьших квадратов (рисунок 7).

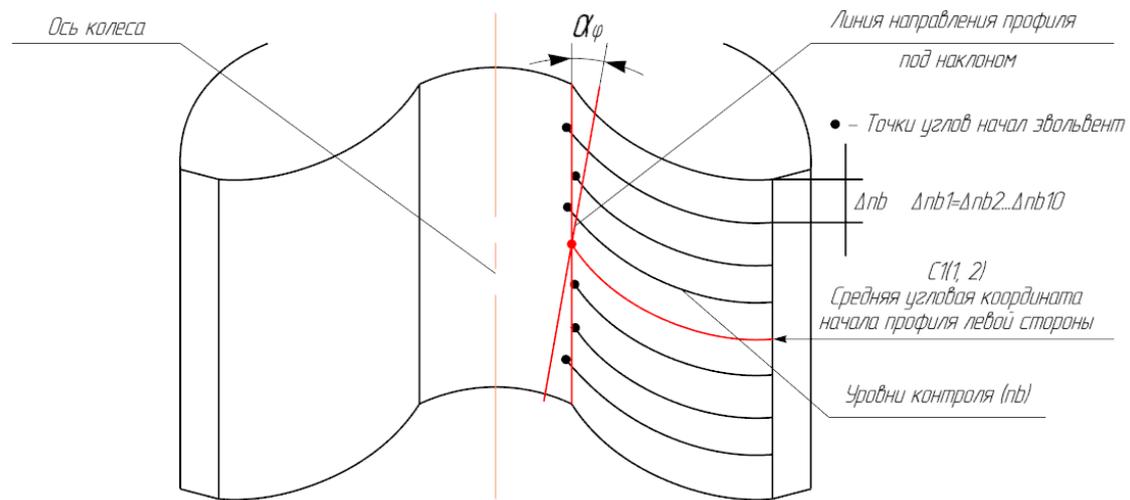


Рисунок 7 – Определение погрешности направления зуба

Для каждой контролируемой впадины k определяется средний угол наклона $\alpha_{\varphi k}$, а среднее значение по всем $\alpha_{\varphi c}$ определяет отклонение направляющей зуба относительно оси зубчатого колеса F_{Br} :

$$F_{Br} = h_K \frac{m_n Z_K}{2R_b} \operatorname{tg} \alpha_{\varphi c}.$$

Для всех впадин k определяют средние значения начал эвольвент μ_{Lk} и μ_{Rk} , относительно направляющей, параллельной оси, и для всех контрольных точек определяют и записывают отклонение профиля f_{frijk} , рассчитанные от полученных эвольвентных профилей.

Расчет радиального биения F_{rr} производится на основании смещения центра расположения зубчатого венца относительно оси базовой системы координат колеса на величины элементарных шагов $\Delta X_{\text{ц}}$ и $\Delta Y_{\text{ц}}$. Относительно нового центра по приведенной выше методике рассчитывают средние значения начал эвольвент с левой и правой сторон для каждой впадины k (число контрольных впадин должно быть не менее 6). Далее в новой системе координат определяются координаты точек пересечения новых аппроксимирующих эвольвент с делительной окружностью r ($m_n Z_K / 2$).

Положение центра зубчатого венца можно определить по минимальному расхождению толщин впадин зубьев на делительном цилиндре.

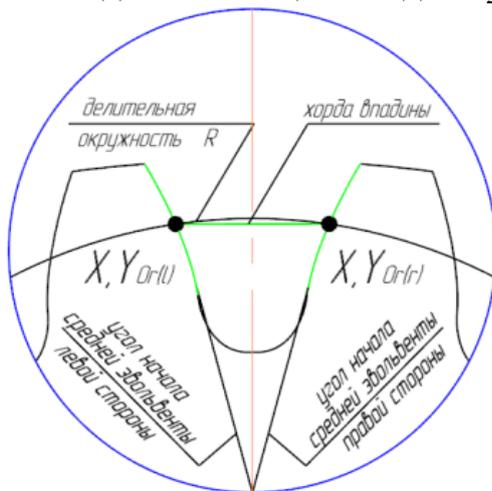


Рисунок 8 – Определение начальной длины хорды на примере одной впадины

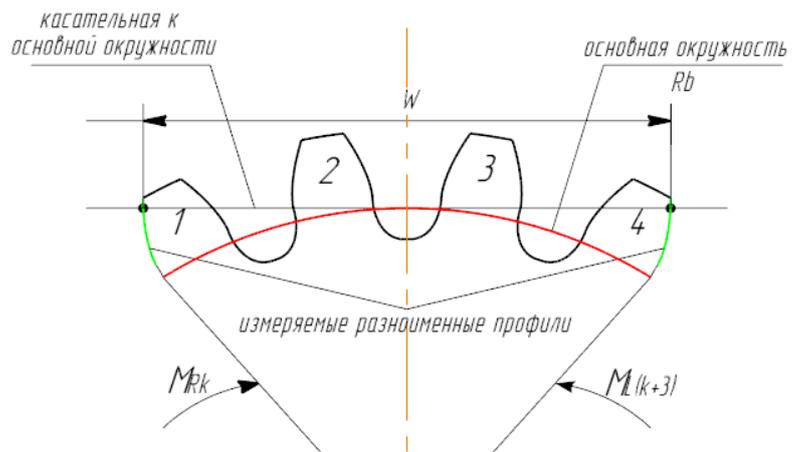


Рисунок 9 – Оценка длины общей нормали по 4-м зубьям охвата

Обычно в расчетах ширину впадины заменяют на размер хорды (рисунок 8). Изменяя $\Delta X_{\text{ц}}$ и $\Delta Y_{\text{ц}}$, добиваются, чтобы разница между минимальным S_{zmin} и максимальным S_{zmax} значением хорд была бы минимальной.

Тогда радиальное биение можно определить как:

$$F_{rr} = \sqrt{\Delta X_{\text{ц}}^2 + \Delta Y_{\text{ц}}^2}.$$

Погрешность профиля зуба f_{fr} принимается в виде оценки всех ранее найденных $f_{frijk}(f_{frmax}, f_{frmin})$. Отклонение шага зацепления f_{pbr} определяется по двум одноименным сторонам соседних зубьев (впадин). Для этого предусматривается контроль соседних впадин в трех местах зубчатого венца:

$$f_{pbr} = \pi m_n - r \left(\mu_{L(R)k+1} - \mu_{L(R)k} \right) + f_{frijk(k+1)max} \frac{r}{R_b},$$

где $f_{frij(k+1)max}$ – максимальное значение из двух серий $f_{frij(k+1)}$ и f_{frijk} .

Длина общей нормали – W определяется в трех местах зубчатого венца, предусмотренных при разработке программы контроля (рисунок 9)

$$W = (\mu_{L(k+3)} - \mu_{Rk}) R_b.$$

Фактическое дополнительное смещение исходного контура – E_{Hr} производится по данным контроля смежных впадин, позволяющим рассчитать толщину зуба по дуге делительной окружности:

$$E_{Hr} = \frac{\frac{\pi m_n}{2} - S_b}{2 \operatorname{tg} \alpha_n}, \text{ где } S_b = (\mu_{L(k+1)} - \mu_{Rk} - 2 \operatorname{inv} \alpha_n) r.$$

Подобные расчеты проводятся для 3 зубьев и по минимальному и максимальному значениям выполняется оценка качества зубьев.

Указанные рекомендации реализованы в программе для ЭВМ № 2024686365, зарегистрированной в федеральной службе по интеллектуальной собственности.

В пятой главе представлены результаты практической реализации результатов исследования.

Разработанное в рамках выполненного диссертационного исследования методическое и программное обеспечение для оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колес нормативно закреплено в пяти методических указаниях (инструкциях): МИ 01-24 «Алгоритм расчета координат точек контроля боковой поверхности зубчатого колеса»; МИ 02-24 «Алгоритм контроля расположения расчетных координат контрольных точек на боковой поверхности зубчатого колеса»; МВИ 03-24 «Контроль геометрических параметров зубчатых колес с применением универсальных координатно-измерительных машин»; МИ 04-24 «Алгоритм обработки массива координат измеренных точек боковой поверхности зубчатого колеса»; МИ 05-24 «Алгоритм оценки результатов контроля зубчатого колеса». Данные инструкции были утверждены отделом главного метролога АО «АК «Туламашзавод», приняты к внедрению отделом метрологии АО «Тулаточмаш», и использованы для проведения процедуры выборочного контроля продукции следующих предприятий г. Тулы: ООО «Станкотехника», АО «КБП им. академика А. Г. Шипунова», ООО «Сфера». При этом были произведены оценки показателей качества зубчатых колес степеней точности 7D, 8B, 8Cd, входящих в состав выпускаемых данными предприятиями изделий, в том числе и специального назначения.

В заключении представлены итоги выполненного исследования, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложении представлены: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; распоряжение АО «АК «Туламашзавод» о принятии к внедрению методических инструкций; акт внедрения результатов НИР в АО «Тулаточмаш»; акты о проведении выборочного контроля групп зубчатых колес по заказам предприятий ООО «Станкотехника», АО «КБП им. академика А. Г. Шипунова», ООО «Сфера».

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 высокоточного 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 4×5...7×10 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 КИМ на основе существующих возможностей таких машин 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 «Тулаточмаш» (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 выступлениями» любой формы на универсальных КИМ и доведение его до полной автоматизации с использованием искусственного интеллекта.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ИЗДАНИЯХ:

Статьи в рецензируемых научных изданиях:

1. Васин, С.А., Маликов А.А., **Никольский С.М.** Обоснование объема контрольных операций на основе статистических методов управления качеством продукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2025. – Т. 23 – № 1. – С. 103-109.

2. Васин, С.А., Маликов А.А., **Никольский С.М.** Определение необходимого объема измерений при контроле параметров качества зубчатых колес на координатно-измерительной машине // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27. – № 1. – С. 42-48.

3. Маликов А.А., **Никольский С.М.** Функционально-стоимостной анализ использования КИМ для контроля качества зубчатых колес и обкатного зубообрабатывающего инструмента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – Вып 1. – С. 259-263.

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

5. Ушаков М.В., Воробьев И.А., **Никольский С.М.** Анализ возможностей существующего программного обеспечения КИМ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 10. – С. 506-510.

6. Ушаков, М. В., Воробьев И.А., **Никольский С.М.** Возможности использования метода координатного контроля для оценки качества изготовления зубчатых // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 2.

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

8. Ушаков М.В., Воробьев И.А., **Никольский С.М.** Стратегия контроля параметров зубчатых колес на КИМ // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 2 (364). – С. 177-181.

9. **Никольский С.М.** Расчет экономической эффективности эксплуатации координатно-измерительной машины // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 9. – С. 601-603.

10. **Никольский С.М.** Методика обработки измерительной информации при контроле геометрических параметров зубчатых колес на КИМ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – Вып. 8. – С. 167-173.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

11. Программно-вычислительный комплекс контроля геометрических параметров цилиндрических прямозубых немодифицированных зубчатых колес [Текст]: свид-во о регистрации программы для ЭВМ № 2024686365 / Ушаков М.В., Воробьев И.А., **Никольский 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 07.11.2024. Бюл. № 11.

Подписано в печать 11.04.2025

Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,6. Тираж 100 экз. Заказ 003а.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ.

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95