

Разработка измерительного оборудования и программно-методического обеспечения для контроля параметров зубчатых колес и передач

Игорь Васильевич Сурков

ЗАО „ЧелябНИИконтроль“, Россия, 454008, г. Челябинск, Свердловский тракт 38, e-mail: suiv@toolmaker.ru, Web: www.toolmaker.ru

Резюме: Приведено описание разработанного оборудования, методического и программного обеспечения для автоматизированных измерений геометрических параметров зубчатых колес и передач. Рассмотрены вопросы практического применения методики объемной калибровки координатно-измерительных машин, приборов и систем с последующей программной компенсацией выявленных систематических погрешностей, а так же особенности размерно-точностного анализа результатов координатных измерений.

Ключевые слова: координатно-измерительные приборы, машины и системы, программное обеспечение для координатных измерений, контроль геометрических параметров зубчатых колес и передач.

1. Введение.

В большинстве современных изделий, выпускаемых предприятиями машиностроения и приборостроения, используются зубчатые передачи, которые в конструктивном, технологическом и метрологическом отношении являются одними из наиболее сложных элементов машин и механизмов. Рост требований к качеству зубчатых колес и передач приводит к непрерывному совершенствованию и усложнению методов их проектирования, технологий изготовления, средств и методов контроля.

При контроле зубчатых колес помимо универсальных и специальных средств измерения типовых геометрических параметров (размеров элементов: диаметра и отклонения от цилиндричности базового отверстия, шеек под подшипники вала-шестерни; расстояний между торцами; отклонений от перпендикулярности или параллельности и т. д.) применяют большое число специализированных приборов контроля параметров, характеризующих эксплуатационные показатели зубчатого колеса или зацепления [1].

На российских предприятиях машиностроения и приборостроения сегодня применяется широкая номенклатура средств

измерения геометрических параметров зубчатых колес. Это в основном ручные не автоматизированные приборы традиционной конструкции, выпущенные советскими инструментальными заводами (в т. ч. Челябинским инструментальным заводом (ЧИЗ)) в 60–80-х годах прошлого века. Эти приборы морально устарели и в результате длительной эксплуатации потеряли свои точностные характеристики. Учитывая некоторый здоровый «консерватизм» присущий большинству работников метрологических и технологических подразделений предприятий ЗАО «ЧелябНИИконтроль» продолжает выпускать большинство моделей зубоизмерительных приборов традиционной номенклатуры ЧИЗ (биениемер Б-10М, межцентромеры МЦ-160, МЦ-400, кинематомер 5094). Но большой проблемой является низкий уровень автоматизации и узкая специализация этих приборов, т. е. для каждого контролируемого параметра необходимо применять свое средство измерения [2]. Это неудобно и потребителю (необходимо иметь полный комплект разнообразных приборов) и производителю

(широкая номенклатура конструкций приборов, выпускаемых неритмично и единичными экземплярами).

2. Автоматизация процессов измерений.

Анализ современных тенденций развития машиностроительного комплекса показал, что обеспечение качества выпускаемой продукции в современном многономенклатурном производстве невозможно без гибких систем автоматизированного контроля.

Часть традиционных зубоизмерительных приборов, выпускаемых ЗАО «ЧелябНИИконтроль», за счет установки мехатронных модулей, применения систем компьютерного управления и специализированного метрологического программного обеспечения (ПО) преобразована в современные информационно-измерительные комплексы и системы с различной степенью автоматизации. Например, установка вместо индикатора часового типа цифровой измерительной головки (рис. 1) с проводным или беспроводным интерфейсным соединением с компьютером, оснащенный разработанным ЗАО «ЧелябНИИконтроль» ПО, обеспечивает автоматизацию процессов получения, обработки и анализа измерительной информации (рис. 2) при проведении двухпрофильного контроля параметров зубчатого колеса на межцентромере НИИК-1020-400 (аналог МЦ-400). При этом все основные действия (управление процессом измерения, перемещение узлов прибора, вращение зубчатых колес) в ручном режиме осуществляет контролер. Для измерения кинематической погрешности колеса и передачи в автоматическом цикле серия приборов НИИК-1020 (с межцентровым расстоянием от 160 до 800 мм) дополнительно оснащается электромеханическими приводами, двумя круговыми и одним линейным измерительным преобразователем (энкодером), контроллером и компьютером с новой версией ПО. Кроме выполнения процессов комплексного двухпрофильного контроля новая модификация НИИК-1020

может обеспечить режим однопрофильного контроля кинематической погрешности, объединив возможности межцентромера и кинематомера.



Рис.1. Установка цифровой измерительной головки Sylvac с проводным интерфейсным соединением с компьютером на межцентромере НИИК-1020-400

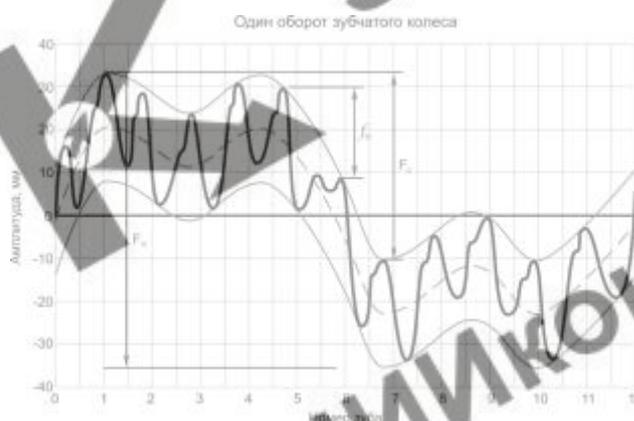


Рис.2. Пример графической интерпретации результатов автоматизированного контроля на межцентромере НИИК-1020-400

Однако, наибольший эффект следует ожидать от внедрения на российских предприятиях новых методов и средств контроля, в том числе координатных измерительных машин (КИМ), приборов и систем (КИС) различных компоновок и типоразмеров. Положенный в основу работу КИМ и КИС координатный метод измерения является наиболее универсальным и может успешно применяться для автоматизированного контроля широкой

номенклатуры прецизионных деталей и инструментов (в том числе зубчатых колёс, червячных фрез, долбяков и других инструментов для зубообработки).

Принципиальная основа координатного метода измерения заключается в том, что любую поверхность или профиль можно представить состоящей из бесконечного числа отдельных точек и если известно положение в пространстве какого-то ограниченного числа этих точек (массив точек), т. е. с помощью прецизионного координатно-измерительного оборудования определены их координаты, то по соответствующим формулам (алгоритмам) можно рассчитать размеры этих поверхностей (профилей) и отклонения формы, а также определить расположение поверхностей (профилей) в пространстве и между собой (координатные размеры и отклонения расположения) [3].

3. Разработка и производство оборудования для координатных измерений зубчатых колес.

В соответствии с планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) ЗАО «Челябинский научно-исследовательский и конструкторский институт средств контроля и измерений в машиностроении» (ЗАО «ЧелябНИИконтроль») выполняется разработка новой серии многофункциональных измерительных приборов и систем модульной конструкции, предназначенных для высокоточных измерений деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями, по сути специализированных КИС. На стадиях проектирования, изготовления и испытаний новых приборов проводятся исследовательские работы и выполняются мероприятия для снижения нормируемой погрешности координатных измерений.

Для проведения предварительного анализа кинематики приборов, особенностей закрепления различных конструкций и типоразмеров измеряемых деталей специалисты ЗАО «ЧелябНИИконтроль» выполняют компьютерное моделирование новых вариантов структур и компоновок

измерительных систем (рис. 4). Широко используются принципы сквозного компьютерного проектирования (CALS технологии). Сокращение времени разработки и снижение себестоимости изготовления новых измерительных приборов достигается за счет обеспечения модульности конструкций механических узлов, электронных блоков и программного обеспечения. Унификация модулей позволяет получить широкую гамму измерительных приборов и систем различного назначения и компоновки из ограниченного числа функциональных модулей и узлов. Замена механических модулей мехатронными позволяет значительно сократить длину кинематических, функциональных и размерных цепей, повысить точность и степень автоматизации процессов контроля.



Рис.3. Компьютерное моделирование новых вариантов структур и компоновок измерительных систем

В 2008 г. изготовлена и внесена в Госреестр средств измерения трехкоординатная многофункциональная измерительная система НИИК-484 (для контроля параметров зубчатых колес, червячных фрез, долбяков). Управление системой, перемещение узлов осуществляет оператор, съём измерительной информации, расчеты, оформление протоколов автоматизированы за счет использования ПО «ТЕХНОкоорд».

Для реализации полностью автоматизированного цикла координатных измерений высокоточных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями в 2008–2013 гг. выполнен большой объём НИОКР, изготовлены и испытаны несколько прототипов новой четырехкоординатной измерительной системы с компьютерным управлением НИИК-483 [4]. КИС НИИК-483 является многофункциональной и гибкой базовой платформой для создания целого комплекса координатно-измерительных приборов, машин и систем. Например, по заказу ОАО «НИИИзмерения» были разработаны и изготовлены механические части КИС для контроля червячных фрез (БВ-5139) и долбяков (БВ-5140). Результаты испытаний учтены в новой усовершенствованной серии КИС НИИК-485. В зависимости от требований заказчиков для сборки готовой системы используются типовые функциональные модули, узлы и электронные блоки собственной разработки, комплектующие ведущих мировых производителей (энкодеры и измерительные головки Renishaw, привода и контроллеры Siemens, Bosch Rexroth, линейные направляющие и подшипники INA и др.). Компоновка четырехкоординатных КИС с вертикальной осью вращения обеспечивает выполнение автоматизированных циклов контроля геометрических параметров насадных и валковых зубчатых колес (рис. 4), резьбовых калибров, червячных фрез и других высокоточных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями.

Кроме стандартных схем установки с помощью верхнего и нижнего центра (валы-шестерни, а также насадные детали и инструменты с использованием комплекта центровых оправок) предусмотрена возможность закрепления контролируемых деталей непосредственно на поворотный стол или в дополнительно установленном патроне.



Рис.4. Четырехкоординатная измерительная система НИИК-483

4. Анализ нормативной базы и разработка типовых методик координатных измерений зубчатых колес.

Методика координатных измерений (МКИ) включает в себя стратегию измерения (число точек, их расположения на контролируемых поверхностях и последовательность обхода) и расчетную модель, математически описывающую взаимосвязь координат измеренных точек с определяемыми линейно-угловыми параметрами. МКИ – это основа эффективного программного обеспечения (ПО) для координатно-измерительной техники.

ПО для координатных измерений на универсальных КИМ (например, базовая версия ПО «ТЕХНОкоорд») предоставляет пользователю возможность запрограммировать для контроля одной и той же детали или геометрического элемента различные варианты МКИ. Например, в качестве стратегий измерения цилиндра могут быть выбраны траектории движения «спираль», «по сечению», «по образующим» с различной плотностью расположения измеряемых точек. Аналогично, для других геометрических элементов (плоскость, сфера, конус) также существуют различные варианты стратегий измерения. По координатам измеренных точек, принадлежащих реальным

геометрическим элементам детали (первичная информация о реальной геометрии), рассчитывается ассоциированная (числовая) модель детали в виде комплекта заменяющих элементов, упорядоченно расположенных в обобщенной системе координат. ПО «ТЕХНОкоорд» (как и большинство других программных пакетов) предоставляет пользователю возможность выбора метода математической аппроксимации заменяющих элементов: среднеквадратичная, по условию максимума или минимума материала, по методу минимальной зоны, сплайновая [5]. Каждый вариант аппроксимации дает разный результат расчета действительных размеров, отклонений формы и расположения элементов контролируемой детали. Пользователь сам отвечает за правильность выбора МКИ, ориентируясь на служебное назначение детали.

Другой подход к назначению МКИ сложился при координатных измерениях узкой номенклатуры типовых деталей и инструментов (зубчатые колеса, червячные фрезы, долбяки и др.). Для уменьшения ошибок, исключения неоднозначности и субъективности необходимо предельно ограничить универсальность и обеспечить защиту от несанкционированных изменений типовой (заданной разработчиком ПО) методики координатных измерений [6]. В этом случае ответственность за правильность выбора МКИ и качество ее реализации при программировании процессов координатных измерений зубчатых колес несет разработчик специализированного метрологического ПО.

Большие сложности при разработке оптимальных МКИ зубчатых колес возникают у российских специалистов. Это вызвано устарелостью отечественной нормативной научно-технической документации и её несоответствиями с современными рекомендациями ISO. ГОСТ 1643-81 [7] (распространяется на эвольвентные цилиндрические зубчатые колёса и зубчатые передачи внешнего и внутреннего зацепления) не перерабатывался уже более 30 лет. Зарубежная нормативная база постоянно обновляется, в новые

редакции стандартов добавляют описание современных средств и методик измерений, в т. ч. особенности применения КИМ и КИС. На возникающие периодически предложения отменить ГОСТ 1643-81 и ввести в действие гармонизированный с ISO 1328 (ч.1 [8] и 2 [9]) новый стандарт можно обосновано возразить:

1. Введенное в ГОСТ 1643-81 положение о разделении норм точности на 4 группы (нормы кинематической точности, нормы плавности, нормы контакта и нормы сопряжения по боковому зазору) позволяет с высокой эффективностью учесть условия работы той или иной передачи.

2. Каждая норма точности зубчатого колеса, а также сопряжения по боковому зазору имеют несколько измеряемых параметров, которые являются равноправными. Нормы точности стандарта ГОСТ 1643-81 включают в себя поэлементные показатели (объединённые в комплексы) и комплексные показатели точности зубчатых колёс и передач. Завод-изготовитель может выбирать измеряемые параметры в зависимости от условий работы передачи, их степени точности, а главное, исходя из имеющихся в наличии или существующих в промышленности средств контроля. Всегда существует вариант выбора комплекта не дорогих средств измерения.

3. В отличие от ГОСТ 1643-81 в ISO 1328 (ч. 1 и 2) и национальных стандартах большинства других стран нет деления на нормы точности зубчатых колес, приведены обязательные для контроля поэлементные и комплексные параметры и их степени точности, допуска которых сильно отличаются от соответствующих степеней точности ГОСТ 1643-81.

Принудительный перевод Российской промышленности на международную нормативную базу приведет к потере преимуществ, заложенных в структуру ГОСТ 1643-81, введет в список обязательных дорогостоящие средства измерения (эвольвентометры, специализированные КИМ и КИС), а главное, обяжет всех производителей в России провести переработку десятков миллионов чертежей

зубчатых колес, технологических процессов их изготовления и контроля.

Не дожидаясь доработки Российских стандартов до современного уровня специалисты ЗАО «ЧелябНИИконтроль» разработали комплект типовых МКИ зубчатых колес. В их основу положены базовые принципы ГОСТ 1643-81 и рекомендации нормативных документов немецкого общества VDI/VDE ([10], [11]). Типовая стратегия измерения насадных шестерен (рис. 5) на четырехкоординатной измерительной системе (типа НИК-483 или НИИК-485) включает в себя математическое базирование (определение системы координат детали по базовым поверхностям) и определение заданного массива координат точек на боковых эвольвентных поверхностях зубьев.



Рис.5. Типовая стратегия четырехкоординатных измерений шестерни

5. Разработка программного обеспечения для координатных измерений зубчатых колес.

Для реализации типовых МКИ зубчатых колес на четырехкоординатной измерительной системе (типа НИК-483 или

НИИК-485) разработан программный модуль «ТЕХНОкоорд-Эвольвента» для ПО «ТЕХНОкоорд-4К» (рис. 6). ПО обеспечивает настройку измерительной системы, выполнение программы измерения в автоматическом и наладочном (от пульта управления) режиме, а также анализ результатов измерения и автоматизированное оформление протокола. Кроме этого, ПО используется для проведения типовых процедур координатной метрологии: калибровки измерительных головок (ИГ) и измерительных наконечников (ИН), математического базирования для определения положения системы координат детали в рабочем пространстве КИМ, поверки и калибровки для определения соответствия фактических метрологических характеристик КИМ нормируемым и т.д.

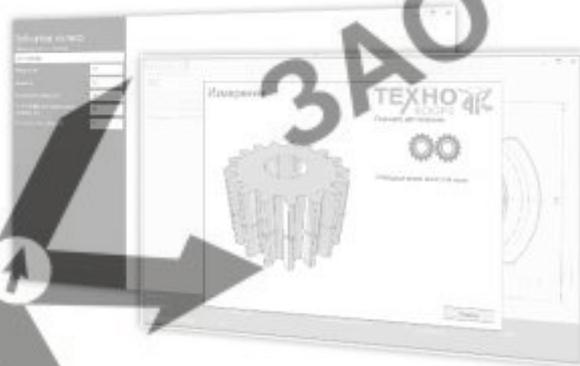


Рис.6. Скриншоты ПО «ТЕХНОкоорд-4К»

Для реализации циклов управления процессами измерений, рабочими и холостыми перемещениями были спроектированы программные модули и подпрограммы управления четырехкоординатными перемещениями. В сочетании с набором типовых команд, функций и подпрограмм для анализа результатов координатных измерений и составления отчетов были разработаны типовые управляющие программы (УП) измерения стандартных конструкций типовых деталей и инструментов. За счет параметрической структуры УП производится ее адаптация для каждого конкретного случая измерения в зависимости от конструкции, типоразмера и степени точности контролируемых

параметров. Типовые параметрические УП хранятся в «закрытой» от пользователей базе данных, которая обеспечивает защиту от несанкционированных изменений стандартной (заданной разработчиком ПО) методики координатных измерений.

Через систему взаимозависимых меню и окон генерируются стандартные инструкции для операторов и наладчиков комплекса: схемы измерения, установки и математического базирования контролируемых деталей и инструментов, список используемой оснастки, последовательность установки ИГ, ИН и схемы их калибровки. Оператору-контролеру остается только строго следовать инструкциям задающим последовательность ручных и автоматических этапов контроля.

На сегодняшний день программное обеспечение «ТЕХНОкоорд-4К» дополняется новыми модулями, предназначенными для измерения геометрических параметров прецизионных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями (резьбовые калибры, червячные фрезы, долбяки, конические и червячные зубчатые колеса и т.д.)

6. Заключение.

Большой объем НИОКР, выполненных специалистами ЗАО «ЧелябНИИконтроль», позволил запустить в производство серию новых многофункциональных координатно-измерительных приборов и систем модульной конструкции, предназначенных для контроля зубчатых колес и передач. Разработано современное ПО, обеспечивающее управление оборудованием в автоматическом цикле и размерно-точностной анализ результатов координатных измерений.

Более подробную информацию можно получить на сайте www.toolmaker.ru или посылв запрос по e-mail: suiv@toolmaker.ru.

7. Литература:

[1] Тайц, Б.А. Точность и контроль зубчатых колес / Б.А. Тайц. – М.: Машиностроение, 1972. – 369 с.

[2] Сурков, И.В. Метрологическое обеспечение процесса контроля зубчатых колес / И.В. Сурков, Н.В. Сырейщикова // Измерения: состояние, перспективы развития // Тезисы докладов международной научно-практической конференции. Т. 1 – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 225–227.

[3] Surkov, I.V. *Development of methods and means of coordinate measurements for linear and angular parameters of cutting instruments / Measurement Techniques: Volume 54, Issue 7 (2011), Page 758-763.*

[4] Сурков, И.В. *Разработка оборудования и программного обеспечения для координатных измерений прецизионных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями / И.В. Сурков, А.И. Буртовая // Тезисы докладов 23-го национального научного симпозиума с международным участием “Metrology and metrology assurance 2013” – Созополь (Болгария): 2013 (ISSN 1313-9126). – С. 186 – 191.*

[5] Сурков, И.В. Разработка математического обеспечения для размерно-точностного анализа результатов координатных измерений / И.В. Сурков, А.И. Буртовая // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 101–104.

[6] Goch, G., *Gear metrology*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2003, 52(2): Page 659-695.

[7] ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски [текст]. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 45 с.

[8] ISO 1328-1:2013 Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification — Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:1328:-1:ed-2:v1:en> - 26.06.2015.

[9] ISO 1328-2:1997 Cylindrical gears — ISO system of accuracy — Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial

composite deviations and runout information [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:1328:-2:ed-1:v1:en> - 26.06.2015.

[10] VDI/VDE 2607 Computer-aided evaluation of profile and helix measurements on cylindrical gears with involute profile. – Dusseldorf: 2000. – 46 s.

[11] VDI/VDE 2612 Profile and helix checking of involute cylindrical gears. – Dusseldorf: 2000. – 18 s.

Сведения об авторах:

Игорь Васильевич Сурков. Инженер-механик, специальность «Технология машиностроения. Станки и инструменты», закончил Челябинский политехнический институт (в настоящее время Южно-Уральский государственный университет) в 1986 г. Кандидат технических наук (1995 г.), доцент кафедры технологии машиностроения Южно-Уральского государственного университета, член-корреспондент метрологической Академии РФ (2005 г.), Почетный машиностроитель РФ (2009 г.). Директор ЗАО «ЧелябНИИконтроль». Область научных интересов – исследование методов координатных измерений геометрических параметров прецизионных деталей и инструментов и управления точностью обработки на станках с ЧПУ.

Development of Equipment and Software for Inspection of Parameters of Gears and Gear Trains

Igor Vasilyevich Surkov

CJSC ChelyabNIIkontrol, 38 Sverdlovskiy trakt, Chelyabinsk, Russia, 454008,
e-mail: suiv@toolmaker.ru, Web: www.toolmaker.ru

Abstract: This paper gives a brief description of the developed equipment, methodology and software for automated measurements of geometrical parameters of gears and gear trains. Issues on practical application of the method of comprehensive calibration of CMMs (coordinate measuring machines), instruments and systems with subsequent software compensation of detected systematic errors, as well as special aspects of dimensional and accuracy analysis of coordinate measurement results, are described.

Key-Words: coordinate measurement instruments, machines and systems, coordinate measurement software, inspection of geometrical parameters of gears and gear trains

- [1] **Tayc, B.A.** *Tochnost' i kontrol' zubchatih koles* / B.A. Tayc. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 369 s.
- [2] **Surkov, I.V.** *Metrologicheskoe obespechenie kontrolya zubchatih koles* / I.V. Surkov, N.V. Sireyshikova. // *Izmereniya: sostoyanie, perspektivi razvitiya* // Tezisi dokladov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. T. 1 – Chelyabinsk: Izdatelskiy centr YUUrGU, 2012. – S. 225 – 227.
- [3] **Surkov, I.V.** *Development of methods and means of coordinate measurements for linear and angular parameters of cutting instruments* / Measurement Techniques: Volume 54, Issue 7 (2011), Page 758-763.
- [4] **Surkov, I.V.** *Razrabotka oborudovaniya i programmnogo obespecheniya dlya koordinatnih izmereniy precizionnih detaley i instrumentov so slozhnoprofil'nimi poverhnostyami* / I.V. Surkov, A.I. Burtovaya. // Tezisi dokladov 23-go nacional'nogo nauchnogo simpoziuma s mezhdunarodnim uchastiem "Metrology and metrology assurance 2013" – Sozopol (Bulgaria): 2013 (ISSN 1313-9126). – S. 186 – 191.
- [5] **Surkov, I.V.** *Razrabotka matematicheskogo obespecheniya dlya razmerno-tochnostnogo analiza rezultatov koordinatnih izmereniy* / I.V. Surkov, A.I. Burtovaya. // *Progressivnie tehnologii v mashinostroenii: sb. nauch. tr.* – Chelyabinsk: Izdatelskiy centr YUUrGU, 2012. – S. 101 – 104.
- [6] **Goch, G.** *Gear metrology*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2003, 52(2): Page 659-695.
- [7] GOST 1643-81. Osnovnie normi vzaimozamenyaemosti. Peredachi zubchatie cilindricheskie. Dopuski. – Moskva: IPK Izdatel'stvo standartov, 2003. – 45 s.
- [8] ISO 1328-1:2013 Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification — Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:1328:-1:ed-2:v1:en> - 26.06.2015.
- [9] ISO 1328-2:1997 Cylindrical gears — ISO system of accuracy — Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:1328:-2:ed-1:v1:en> - 26.06.2015.
- [10] VDI/VDE 2607 Computer-aided evaluation of profile and helix measurements on cylindrical gears with involute profile. – Dusseldorf: 2000. – 46 s.
- [11] VDI/VDE 2612 Profile and helix checking of involute cylindrical gears. – Dusseldorf: 2000. – 18 s.