

**Ключевые слова:**

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

Keywords:

coordinate measuring devices, machines and systems, software for coordinate measurements, control of geometrical parameters of wheel-works and gears

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ПЕРЕДАЧ

Игорь СУРКОВ

Приведено описание разработанного оборудования, методического и программного обеспечения для автоматизированных измерений геометрических параметров зубчатых колес и передач. Выполнен сравнительный анализ ГОСТ 1643-81 и зарубежной нормативной базы, сформулированы предложения для новой редакции российского стандарта. Рассмотрены вопросы практического применения разработанной методики координатных измерений параметров зубчатых колес.

The article describes the designed equipment, methodical support and software for automatic measurements of geometric parameters of gears and transmissions. It presents comparative analysis of GOST 1643-81 and international regulatory framework, as a proposal for a new version of the Russian standard, reviews the issues of practical application of the developed method of coordinate measuring gear settings.

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 том числе Челябинским инструментальным заводом — ЧИЗ) в 60–80-х гг. 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 «Челябинский научно-исследовательский и конструкторский институт средств контроля и измерений в машиностроении» (ЗАО «ЧелябНИИконтроль») продолжает выпускать с небольшой переработкой конструкции и под своей торговой маркой большинство моделей зубоизмерительных приборов традиционной номенклатуры ЧИЗ (биенимер Б-10М, межцентромеры МЦ-160, МЦ-400, кинематомер 5094). Но большой проблемой является низкий уровень автоматизации и узкая специализация этих приборов, то есть для каждого контролируемого параметра необходимо применять свое сред-

ство измерения [2]. Это неудобно и потребителю (необходимо иметь полный комплект разнообразных приборов) и производителю (широкая номенклатура конструкций приборов, выпускаемых неритмично и единичными экземплярами).

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 контроллер. Для измерения кинематической погрешности колеса и передачи в автоматическом цикле серия приборов НИИК-1020 (с межцентровым расстоя-

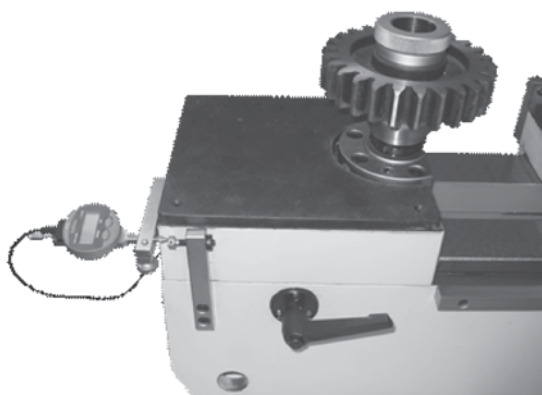


Рис. 1. Установка цифровой измерительной головки Sylvac с проводным интерфейсным соединением с компьютером на межцентромере НИИК-1020-400



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

нием 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.

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 работы координатный метод измерения является наиболее универсальным и может успешно применяться для автоматизированного контроля широкой номенклатуры прецизионных деталей и инструментов (в том числе зубчатых колес, 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), то есть 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].

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В соответствии с планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), ЗАО «ЧелябНИИконтроль» разрабатывает новую серию 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. 3). 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.

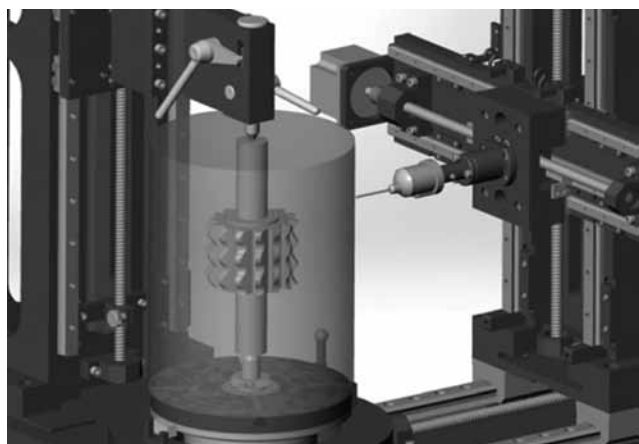


Рис. 3. Компьютерное моделирование новых вариантов структур и компоновок измерительных систем

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, съем 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 объем 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.). В рамках программы импортозамещения выполняются работы по замене импортных модулей и узлов на российские аналоги. 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.

АНАЛИЗ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ И РАЗРАБОТКА ТИПОВЫХ МЕТОДИК КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Методика координатных измерений (МКИ) включает в себя стратегию измерения (число точек,

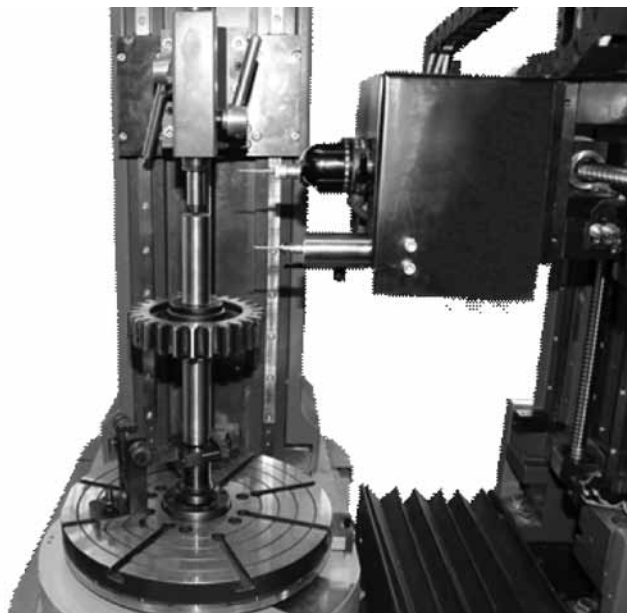


Рис. 4. Четырехкоординатная измерительная система НИИК-483

их расположение 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. В частности, в качестве стратегий измерения цилиндра могут быть выбраны траектории движения «спираль», «по сечениям», «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 тем, что отечественная нормативная научно-техническая документация устарела и она не отвечает современным рекомендациям ISO. ГОСТ 1643-81 [7] (распространяется на эвольвентные цилиндрические зубчатые колеса и зубчатые передачи внешнего и внутреннего зацепления) не перерабатывался уже более 30 лет. Зарубежная нормативная база постоянно обновляется, в новые редакции стандартов добавляются описания современных средств и методик измерений, в том числе 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 четыре 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 (объединенные в комплексы) и комплексные показатели точности зубчатых колес 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 недорогих 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.

С одной стороны, 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 (эвольвентомеры, специализированные КИМ и КИС), а главное, обяжет всех производителей в России провести переработку десятков миллионов чертежей зубчатых колес, технологических процессов их изготовления и контроля. С другой стороны, давно назрела необходимость появления новой редакции российского или межгосударственного стандарта ГОСТ (Р) 1643-20XX, которая, сохранив все достоинства предыдущей версии, была бы дополнена современными методами контроля параметров зубчатых колес, прежде всего координатными.

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, рекомендации нормативных документов немецкого общества VDI/VDE ([10] и [11]), а также результаты собственных научно-исследовательских работ. 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.

В соответствии с общепринятыми рекомендациями ([10], [11]) выбираются минимум четыре зуба (включая базовый), которые по возможности равномерно распределены по окружности. На левой и правой боковой поверхности каждого из выбранных зубьев измеряется массив точек в виде «креста»: отклонение профиля эвольвенты контролируется в среднем сечении, перпендикулярно (вдоль линии пересечения боковой поверхности с расчетной поверхностью делительного цилиндра) измеряется отклонение направления контактной линии зуба. В зависимости от типа измерительной головки применяется стратегия поточечных измерений или циклы сканирования (рис. 6). На правой и левой боковых сторонах остальных зубьев измеряется по одной точке в месте теоретического пересечения центрального

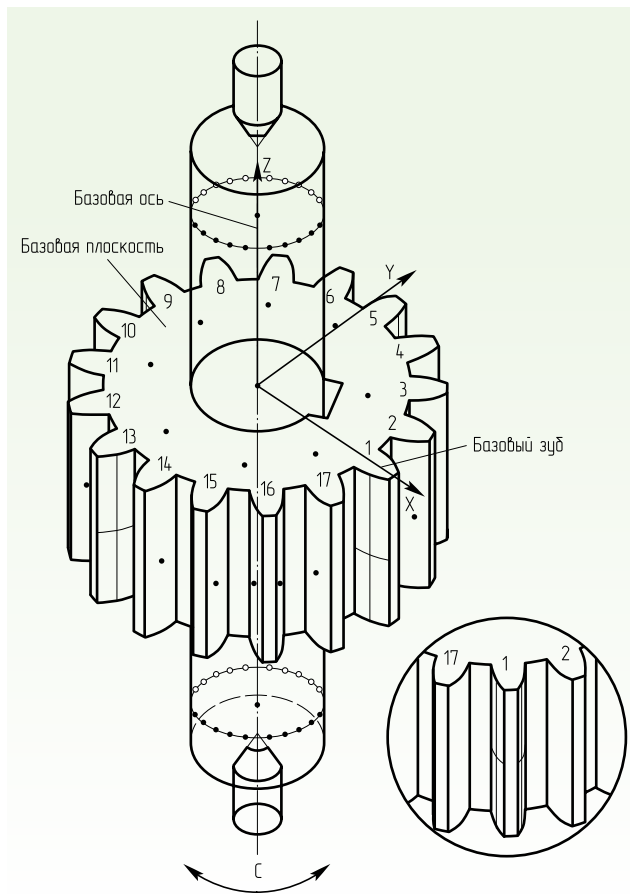


Рис. 5. Типовая стратегия четырехкоординатных измерений шестерни

сечения и контактной линии зуба (рис. 5). Разработанная стратегия координатных измерений обеспечивает определение основных параметров зубчатого колеса (рис. 7).

Измерение массива точек в виде «сетки» на правой и левой поверхности каждого зуба требует очень больших затрат времени. Топографию боковых поверхностей (справа внизу рис. 7) обычно кон-

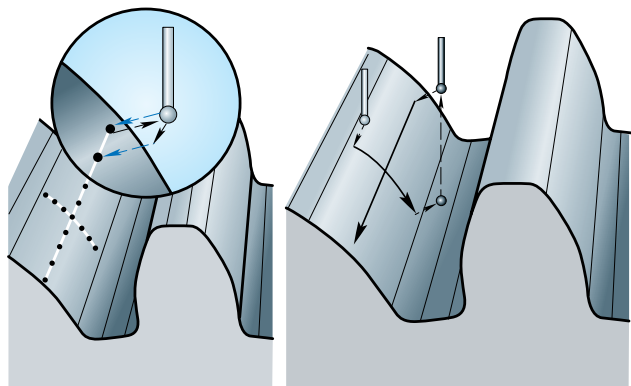


Рис. 6. Стратегии измерения боковых поверхностей зубьев

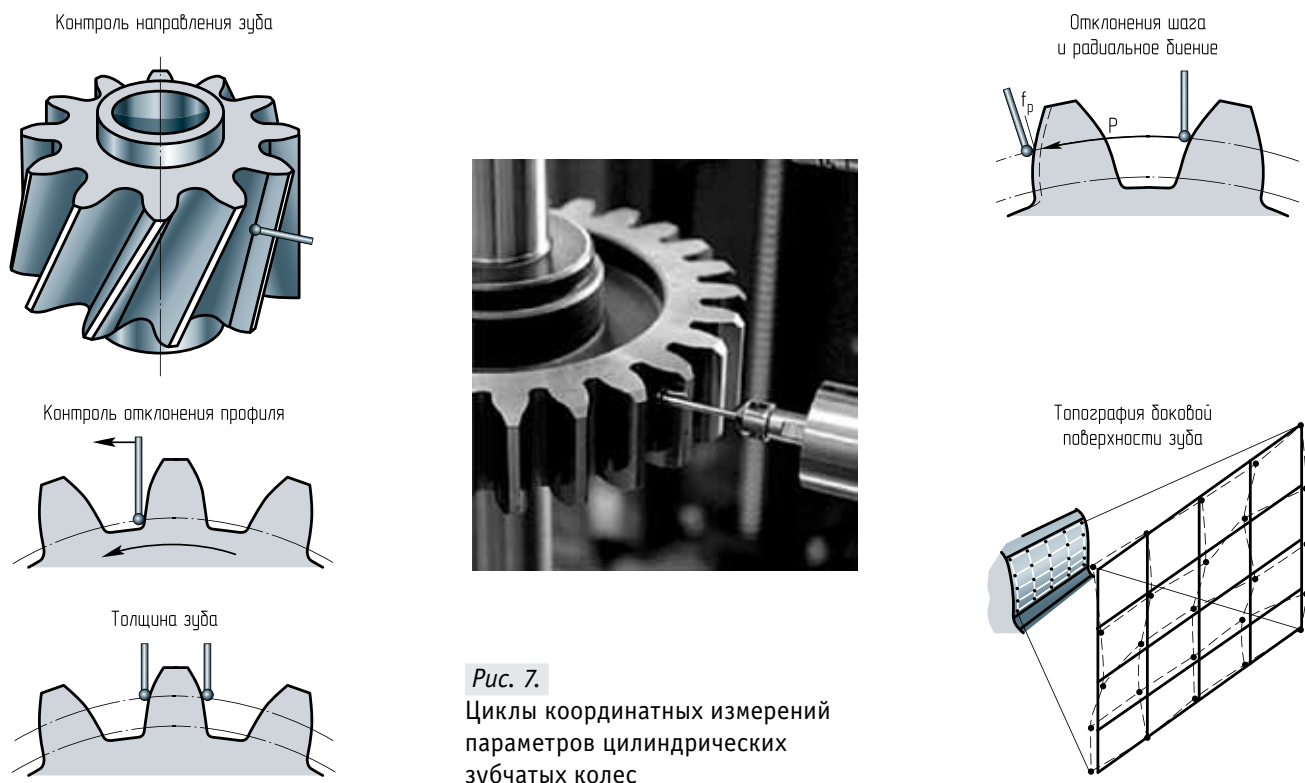


Рис. 7. Циклы координатных измерений параметров цилиндрических зубчатых колес

тролируют при наладке и подналадке прецизионного оборудования для коррекции настроек элементов технологической системы, например, при правке шлифовального круга (рис. 8).

Типовые МКИ помимо стратегий координатных измерений включают в себя разработанные расчетные модели, математически описывающие взаимосвязь координат измеренных точек с определяемыми геометрическими параметрами зубчатых колес.

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. 9). 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, адаптированных для четырехкоординатных измерительных систем с поворотным столом: калибровки измерительных головок (ИГ) и измерительных наконечников (ИН),

математического базирования для определения положения системы координат детали в рабочем пространстве КИС, поверки и калибровки для определения соответствия фактических метрологических характеристик КИС нормируемым и т.д.

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 уста-

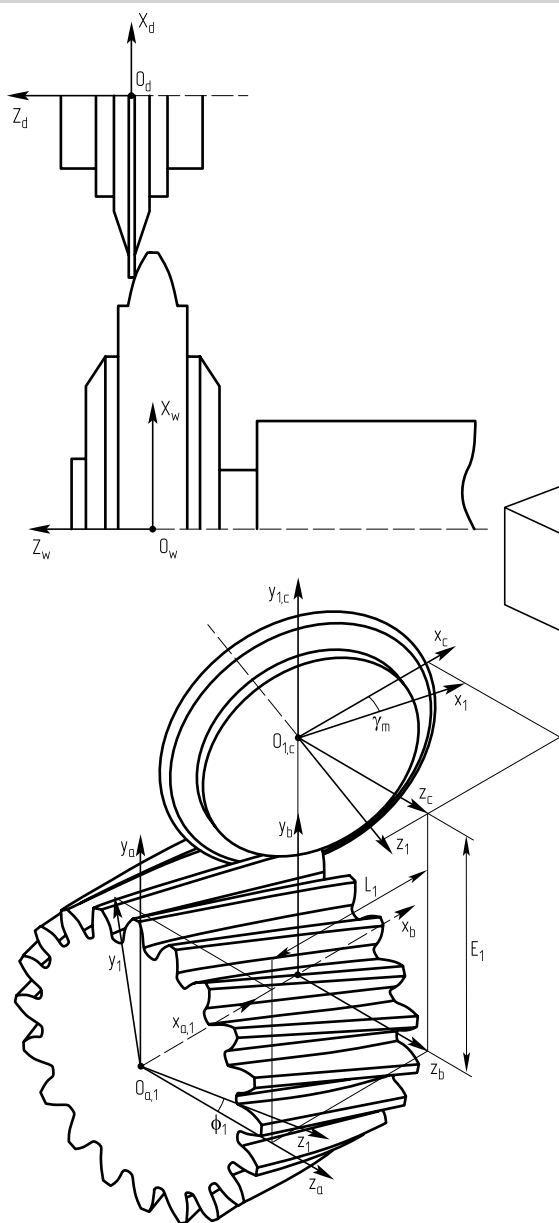
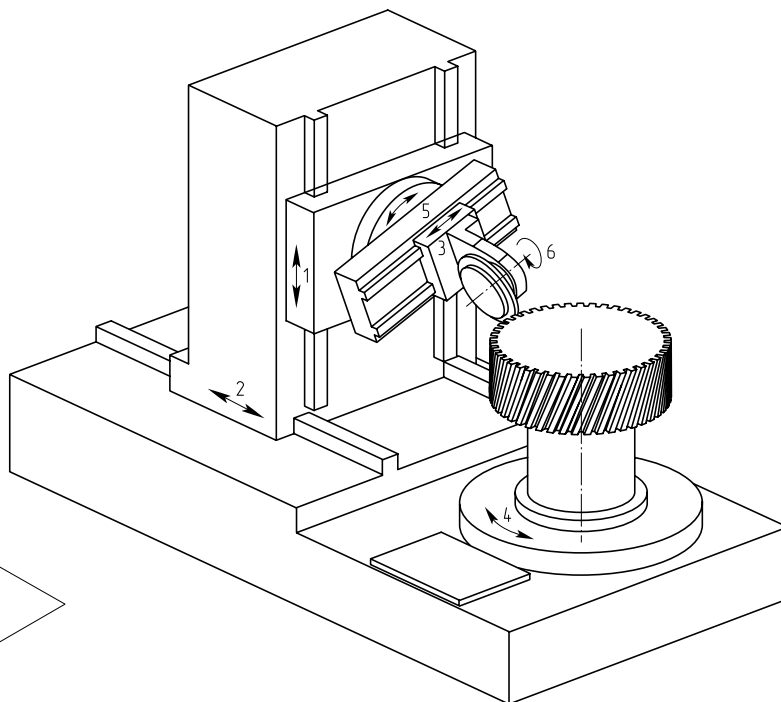


Рис. 8. Схема шлифовальной обработки цилиндрических зубчатых колес



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.)

новки ИГ, ИН и схемы их калибровки. Оператору-контролеру остается только строго следовать инструкциям, задающим последовательность ручных и автоматических этапов контроля.

Вывод

Большой объем НИОКР, выполненных специалистами ЗАО «ЧелябНИИконтроль», позволил запустить в производство серию новых multifunctional 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 посылать запрос по e-mail: suiv@toolmaker.ru.

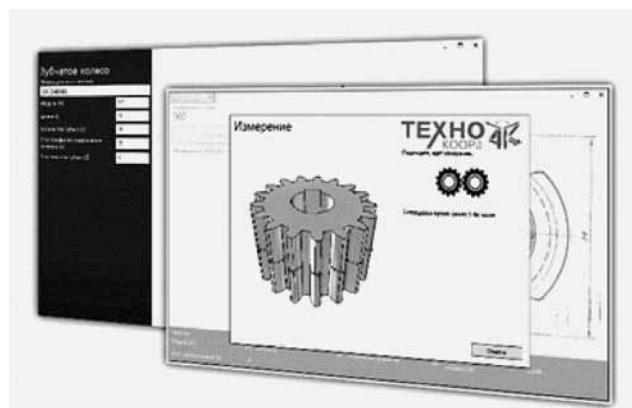


Рис. 9. Скриншоты ПО «ТЕХНОкоорд-4К»

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колес. — М.: Машиностроение, 1972. 369 с.
2. Сурков И.В., Сырейщикова Н.В. Метрологическое обеспечение процесса контроля зубчатых колес // Тезисы докладов международной науч-

- но-практической конференции. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. Т. 1. 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)*. P. 758–763.
 4. *Сурков И.В., Буртовая А.И.* Разработка оборудования и программного обеспечения для координатных измерений прецизионных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями // 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., А.И. Буртовая.* Разработка математического обеспечения для размерно-точностного анализа результатов координатных измерений // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. научных трудов. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. С. 101–104.
 6. *Goch G.* Gear metrology. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*. 2003. 52 (2). P. 659–695.
 7. ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски [текст]. — М.: 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. SO 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.

Игорь Васильевич СУРКОВ —

*кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии машиностроения
Южно-Уральского государственного университета,
член-корреспондент Метрологической академии РФ,
Почетный машиностроитель РФ,
директор ЗАО «ЧелябНИИконтроль»*