



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 приводит к непрерывному совершенствованию и усложнению методов их проектирования, технологий изготовления, средств и методов контроля. Решить задачу контроля качества зубчатых колес помогают приборы, созданные российскими специалистами.

И.В. Сурков, к.т.н., доцент, член-корреспондент Метрологической Академии России, директор,
М.В. Мягкова, магистр техники и технологии, ведущий специалист по зубоизмерительным приборам и системам, ЗАО «ЧелябНИИконтроль», г. Челябинск (Россия)

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ линейно-угловых параметров зубчатых колес

Modern measuring instruments & systems of gear geometrics

Nowadays gears, one of the most complex elements of machinery, are used practically in all modern products. The increase of the requirements to the quality of cog wheels is leading to the constant development and complication of their design methods, fabrication methods, means of control and inspection methods. The solution to the problem of cog wheels quality control is offered by the Russian specialists.

Thus, the present article covers the following issues: the devising of inspection tool for cog wheels linear-angle parameters, measurements that characterize kinematic accuracy and operation softness.

Использование зубчатых колес по видам передач можно оценить примерно следующим образом:

- ♦ цилиндрические зубчатые колеса с внешними зубьями — 85–90% от общего количества, из них около 97% — прямозубые;
- ♦ цилиндрические колеса с внутренними зубьями, в основном прямозубые — 3–4%;
- ♦ конические прямозубые — 6–7%;
- ♦ конические с круговыми зубьями — около 1%.

Ограниченность формата журнальной статьи не позволяет подробно рассказать обо всех существующих на сегодня средствах и методах контроля геометрических параметров зубчатых колес. Учитывая вышеизложенные данные о широте использования различных видов зубчатых передач, в данной статье сначала кратко рассмотрим наиболее распространенные «традиционные» средства контроля цилиндрических зубчатых колес, а затем проведем анализ функциональных возможностей новых зубоизмерительных приборов и систем, а также особенностей методик выполнения измерений.

При контроле зубчатых колес помимо универсальных и специальных средств

Основные измеряемые параметры цилиндрических зубчатых колес (ГОСТ 1643-81)

Нормы	Измеряемый параметр	Обозначение	Степень точности	Номинальный модуль, мм
Кинематической точности	Кинематическая погрешность	F'_{ir}	3–8	1...25
	Накопленная погрешность шага колеса	F_{Pr}	3–8	1...25
	Накопленная погрешность к шагов	F_{Pkr}	3–8	1...25
	Радиальное биение зубчатого венца	F_{rr}	3–12	1...55
	Колебание длины общей нормали	F_{vWr}	3–8	1...40
	Колебание измерительного межосевого расстояния за оборот колеса	F''_{ir}	5–12	1...16
Плавности работы	Местная кинематическая погрешность колеса	f'_{ir}	3–8	1...25
	Погрешность профиля зуба	f_{fr}	3–8	1...25
	Отклонение шага зацепления	f_{Pbr}	3–12	1...55
	Отклонение шага	f_{Pr}	3–12	1...55
	Колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе	f''_{ir}	5–12	1...16
Контакта зубьев	Погрешность направления зуба	$F_{\beta r}$	3–12	1...55
	Суммарное пятно контакта	—	3–11	1...55
Бокового зазора	Гарантированный боковой зазор	j_{nmin}	3–12	1...55
	Наименьшее отклонение толщины зуба	E_{CS}	3–12	1...55

измерения типовых геометрических параметров (размеров элементов: диаметра отверстий, валов; расстояний между торцами; отклонений от перпендикулярности или параллельности и т.д.) применяют большое число специализированных приборов контроля параметров, характеризующих эксплуатационные показатели зубчатого зацепления. В соответствии со стандартами, действующими в Российской Федерации (табл. 1), каждая норма точности зубчатого колеса, а также сопряжения по боковому зазору имеют несколько измеряемых параметров, которые являются равноправными. Завод-изготовитель может выбирать измеряемые параметры в зависимости от условий работы передачи, их степени точности, а главное, исходя из существующих в промышленности средств контроля.

Контроль зубчатых колес служит не только для оценки качества готовой продукции — без него невозможно произвести правильную наладку и диагностику состояния зубообрабатывающего оборудования или найти нарушения в технологическом процессе их изготовления.

Кратко приборы контроля линейно-угловых параметров зубчатых колес можно классифицировать следующим образом:

- ♦ по конструктивному исполнению: на накладные и станковые. Отдельно можно выделить приборы, встраиваемые в технологическую систему, например, измерительную руку с контактным датчиком Renishaw, установленную на зубошлифовальный станок с ЧПУ;
- ♦ по степени механизации и автоматизации: на ручные, механизированные, автоматизированные (от ручных с цифровым отсчетом до измерительных систем с компьютерным управлением), автоматические;
- ♦ по степени специализации: на однопараметрические и многопараметрические; специальные, специализированные и универсальные;
- ♦ по месту в производственном процессе: на приборы для входного, технологического и приемочного контроля.

На предприятиях машиностроения и приборостроения сегодня применяется широкая номенклатура средств измерения линейно-угловых параметров зубчатых колес. Это в основном ручные неавтоматизированные средства измерения и приборы, выпущенные советскими ин-

струментальными заводами в 60-80-х годах прошлого века. Эти приборы не только морально устарели, но и в результате длительной эксплуатации потеряли свои точностные характеристики. Чаще всего для каждого контролируемого параметра используется свое средство измерения, и для полной оценки качества зубчатого колеса необходим целый комплект разнообразных приборов. Это неудобно для потребителя, и для производителя (широкая номенклатура конструкций приборов, выпускаемых неритмично и единичными экземплярами).

Однако, учитывая здоровый консерватизм, присущий большинству работников метрологических и технологических подразделений, а также то, что часть устаревших конструкций приборов продолжает выпускаться, для начала рассмотрим наиболее распространенные на предприятиях «постсоветского пространства» традиционные средства и методы контроля основных параметров для каждой нормы точности и сопряжения по боковому зазору.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ КИНЕМАТИЧЕСКУЮ ТОЧНОСТЬ

Годность зубчатого колеса по нормам кинематической точности может быть полностью определена при контроле радиального биения зубчатого венца F_r (радиальная составляющая) и колебания длины общей нормали F_{vnr} (тангенциальная составляющая).

Для контроля радиального биения зубчатого венца применяется прибор Б-10М (рис. 1), выпускаемый Челябинским инструментальным заводом (ООО НПЧ ЧИЗ).

Измерение радиального биения осуществляется за счет измерительных наконечников специальной формы и размера: в виде конуса с углом 40° для контроля колес внешнего зацепления и в виде шарика для колес внутреннего зацепления (рис. 2). Путем дискретного проворачивания зубчатого колеса вручную наконечник последовательно вводится в каждую впадину. Разность положений наконечника за полный оборот колеса характеризует величину радиального биения зубчатого венца. Дополнительно прибор может комплектоваться наладкой Б-10М.03 для контроля направления контактной линии зубчатых колес.

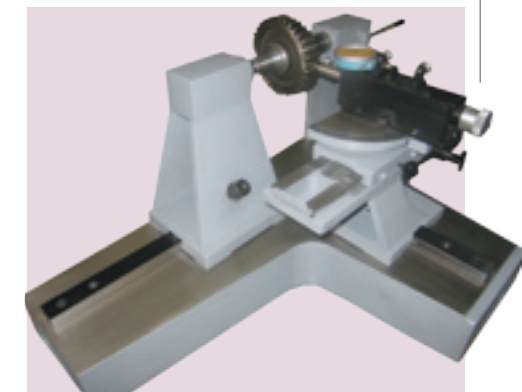


Рис. 1. Прибор Б-10М для контроля радиального биения зубчатого венца

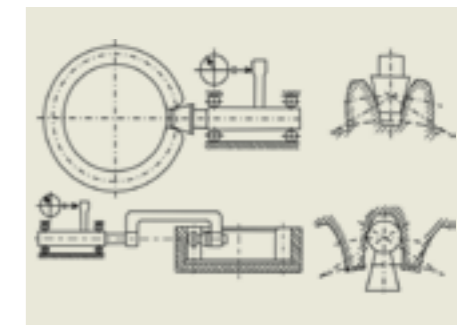


Рис. 2. Схема измерения радиального биения зубчатых колес: а – наружного зацепления; б – внутреннего зацепления

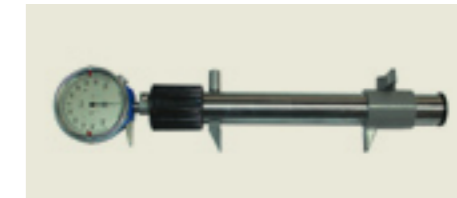


Рис. 3. Нормалемер БВ-5045 для колес наружного зацепления



Рис. 4. Межцентромер МЦ-400 с наладкой для измерений насадных колес



Рис. 5. Шагомер БВ-5070 для измерения отклонения шага



Рис. 6. Эвольвентомер индивидуально-дисковый BV-5032



Рис. 7. Эвольвентомер универсальный VG450

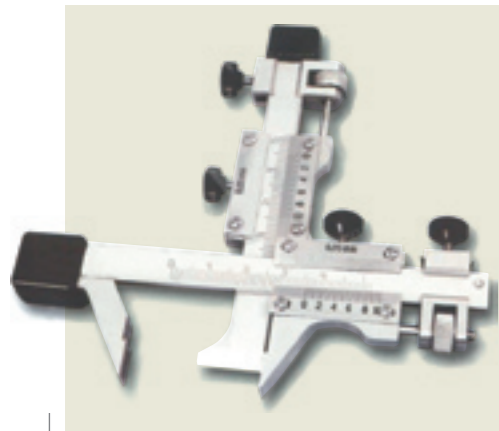


Рис. 8. Штангензубомер

Для измерения колебания длины общей нормали применяются приборы, имеющие две параллельные плоскости, соприкасающиеся с профилями зубьев. Например, измерение длины общей нормали может осуществляться с помощью микрометров, выпускаемых Кировским заводом «Красный инструментальщик» (КРИН), а также нормалемрами БВ-5045 (рис. 3) и БВ-5046, которые изготавливались Ленинградским инструментальным заводом (в настоящее время ОАО «ИЗМЕРОН»).

Для определения кинематической погрешности колеса и передачи используют прибор для комплексного однопрофильного контроля БВ-5094 (ООО НПП ЧИЗ). Специалисты ЗАО «ЧелябНИИконтроль» (этот институт совместно с ООО НПП ЧИЗ входит в промышленный холдинг «Челябинский инструмент») осуществляют ретрофининг этого прибора: устанавливаются новые круговые энкодеры, электронные блоки, прибор комплектуется персональным компьютером со специализированным программным обеспечением.

Для измерений колебаний межосевого расстояния за оборот (комплексный двухпрофильный контроль) применяют межцентромеры МЦ-160, МЦ-400 (рис. 4) и МЦ-800, выпускаемые ООО НПП ЧИЗ и ЗАО «ЧелябНИИконтроль». Приборы оснащаются наладками для контроля насадных и валковых колес, существуют также варианты ручного, механизированного и автоматизированного исполнения приборов.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ПЛАВНОСТЬ РАБОТЫ

Для определения отклонений шагов $f_{r,1}$, а более правильно — отклонений шага от средней величины по колесу, обрабатывают результаты измерения всех шагов при использовании накладных приборов. Разность шагов определяют с помощью накладных шагомеров, выпускаемых заводом «ИЗМЕРОН» (шагомер БВ-5070, рис. 5). Переход на другой измеряемый параметр или вид измеряемого колеса осуществляется сменой измерительных головок.

Для определения погрешности профиля зубчатых колес $f_{r,2}$ применяют в основном эвольвентомеры. Принцип измерения заключается в сопоставлении теоретической

эвольвентной кривой, воспроизводимой точной механикой прибора, с реальной эвольвентой измеряемого зубчатого колеса. По принципиальной схеме воспроизведения теоретической эвольвентной кривой приборы разделяют на индивидуально-дисковые и универсальные. В метрологических лабораториях в основном используют снятые с производства эвольвентомеры БВ-5032 (рис. 6), БВ-5062, КЭУ-М (ООО НПП ЧИЗ) и VG450 (Carl Zeiss, рис. 7).

Возобновление производства механических эвольвентомеров вряд ли целесообразно. За последние 7 лет интерес к возможности изготовления ЗАО «ЧелябНИИконтроль» нового прибора КЭУ-М проявили только 3 потенциальных покупателя. Прибор очень трудоемок в производстве, и при столь низком спросе выпуск единичных экземпляров — слишком длительный и дорогостоящий процесс. Как будет подробно описано ниже, выход состоит в создании нового поколения многопараметрических универсальных приборов и измерительных систем модульной конструкции, одной из функциональных возможностей которых является измерение погрешности профиля зубчатых колес $f_{r,2}$.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ПОЛНОТУ КОНТАКТА

Для измерения суммарного пятна контакта (обычно — после некоторой обработки зубчатой передачи) используют краску или клейкую ленту, наносимую на боковую поверхность зуба. После обката оценивают в процентах размеры отпечатка по отношению к длине и высоте рабочей поверхности зуба.

Как уже отмечалось, для контроля направления контактной линии зубчатых колес может использоваться биенимер Б-10М (ООО НПП ЧИЗ) с дополнительной наладкой Б-10М.03.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ БОКОВОЙ ЗАЗОР

Гарантированный боковой зазор j_{nmin} между нерабочими боковыми поверхностями зубьев колес определяют в собранной передаче с помощью щупа либо путем измерения толщины свинцовой проволоки, заложенной со стороны не-

рабочих поверхностей и обжатой в процессе обката.

Наиболее распространенным прибором для измерения толщины зуба является штангензубомер (КРИН, рис. 8).

Более подробно о конструкции традиционных измерительных приборов и методах контроля цилиндрических зубчатых колес можно прочитать в классическом труде профессора Б. А. Тайца. Особенности контроля конических зубчатых колес (в авиационной промышленности) также описаны в литературе.

Наметившийся в последние годы рост выпуска продукции предприятиями машиностроительного комплекса требует не только обновления парка технологического оборудования, но и закупки новых приборов и систем технического контроля. Правда, мировые тенденции развития систем контроля, с одной стороны, и сокращение кадров квалифицированных метрологов и контролеров, с другой, требуют создания многофункциональных систем и приборов с высокой степенью автоматизации, особенно в области обработки метрологической и технологической информации.

Очевидно, что на машиностроительных предприятиях необходимо внедрять новые методы и средства контроля, в том числе наиболее эффективные на сегодняшний день координатные измерительные машины (КИМ) различных компоновок и типоразмеров. Положенный в основу работы КИМ координатный метод измерения является наиболее универсальным и может эффективно применяться для автоматизированного контроля широкой номенклатуры деталей (в том числе зубчатых колес различного профиля).

Для оценки точности КИМ используют группу показателей по ISO10360-2, один из которых — максимальная допустимая погрешность линейного измерения. Она рассчитывается как $MPE_E = A + L/K$, где A — постоянная часть погрешности (для КИМ средней точности $A = 2 \dots 3$ мкм, для высокоточных $A \leq 1$ мкм), L — длина измерения, K — коэффициент, определяющий величину накопленной части погрешности. Учитывая, что MPE_E — это только половина нормируемой величины погрешности (2σ), для анализа метрологических возможностей КИМ надо использовать удвоенное значение MPE_E ($2 MPE_E \leq 1/3$

TL, где TL — допуск на контролируемый параметр).

Внедрение методики координатных измерений в производство сдерживается из-за ряда факторов:

- ♦ Высокая стоимость новой КИМ (100...200 тыс. евро для машины средней точности и свыше 500 тыс. евро для высокоточного оборудования) и программного обеспечения (примерно 10...15 тыс. евро за базовое программное обеспечение (ПО) и по 5...10 тыс. евро дополнительно за каждый специализированный программный модуль, например, для контроля зубчатых колес, турбинных лопаток и т. д.). Понятно, что с помощью относительно «недорогих» универсальных КИМ средней точности трудно обеспечить возможность контроля части параметров зубчатых колес даже по 6 или 7 степеням точности.

- ♦ Большая часть КИМ и ПО поставляются на рынки стран СНГ зарубежными производителями (DEA (рис. 9), Zeiss (рис. 10), Coord3, Delcam и т. д.), что увеличивает время получения заказчиками оборудования и запчастей, ставит предприятия (в том числе оборонные) в зависимость от политической конъюнктуры и законодательных ограничений других государств. В России универсальные КИМ серийно выпускает только одно предприятие — фирма «ЛАПИК» (г. Саратов, рис. 11, 12).

- ♦ Отсутствие на большинстве машиностроительных предприятиях подготовленных кадров: инженеров-метрологов, контролеров, операторов-наладчиков КИМ. Нет целевых образовательных программ по подготовке и переподготовке специалистов в области автоматизации технического контроля и координатной метрологии.

- ♦ Практически отсутствует методическое обеспечение координатной метрологии: нет утвержденных стандартов, технических условий, методик выполнения координатных измерений типовых деталей. В открытом доступе отсутствует информация о математических моделях и алгоритмах, положенных в основу координатных методов контроля сложнопрофильных деталей, в том числе зубчатых колес. ♦

Продолжение рассказа о методике контроля зубчатых колес с помощью КИМ и о последних разработках ЗАО Челябинский инструментальный завод читайте в следующем номере.



Рис. 9. Портальная КИМ DEA



Рис. 10. КИМ Zeiss с поворотным столом

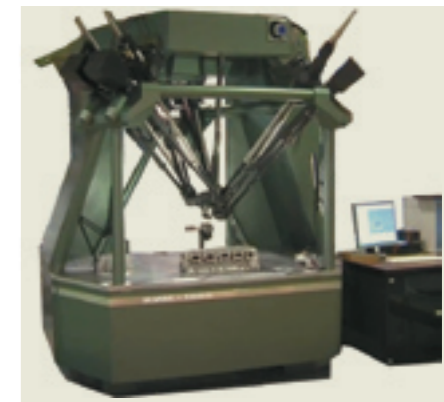


Рис. 11. КИМ «ЛАПИК»



Рис. 12. Контроль зубчатого колеса на КИМ «ЛАПИК»