

# ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС. РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ ТРЕХКООРДИНАТНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Сурков И.В., Мягкова М.В.

В современных машинах и механизмах зубчатые передачи должны иметь меньшие размеры, большую прочность и быть взаимозаменяемы. Эти требования могут быть удовлетворены с помощью зубчатых колес высокой точности, которую можно обеспечить при условии применения правильных методов и средств контроля.

При контроле зубчатых колес помимо универсальных и специальных средств измерения типовых геометрических параметров (размеров элементов: диаметра отверстий, валов; расстояние между торцами; биение и т.д.) применяют большое число специализированных приборов контроля параметров, характеризующих эксплуатационные показатели зубчатого зацепления. Широкую номенклатуру зубоизмерительных приборов выпускал и выпускает Челябинский инструментальный завод. На большинстве российских машиностроительных предприятий до сих пор эксплуатируют приборы, изготовленные ЧИЗ в 60-80х годах прошлого века. Эти приборы устарели морально и предельно изношены физически, что может привести к проблемам в обеспечении качества производства зубчатых колес. Другой проблемой является их узкая специализация, т.е. для каждого контролируемого параметра необходимо применять свое средство измерения. Это неудобно и потребителю (необходимо иметь полный комплект разнообразных приборов) и производителю (широкая номенклатура конструкций приборов, выпускаемых неритмично и единичными экземплярами).

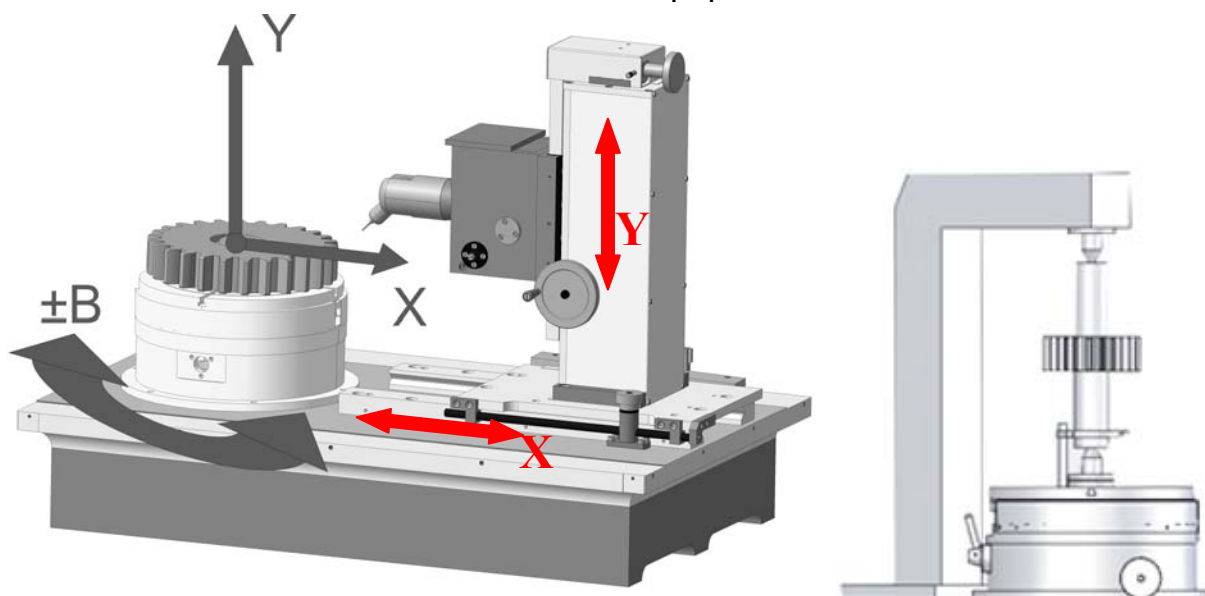
Контроль всех необходимых геометрических параметров зубчатых колес на одном универсальном приборе можно обеспечить с помощью координатных измерений.

Многие производители универсальных координатных измерительных машин (КИМ) предлагают в качестве опций программное обеспечение для контроля зубчатых колес. Сдерживает их широкое распространение высокая стоимость (150-250 тыс.евро) и отсутствие в России стандартизированной методики расчета параметров зубчатых колес по результатам координатных измерений.

Для метрологического обеспечения производства качественных зубчатых колес на российских предприятиях специалистами ЗАО «ЧелябНИИ-контроль» в рамках работ по проектированию многофункциональной модульной трехкоординатной измерительной системы НИИК 482 (с ручным управлением) и НИИК 483 (с автоматическим циклом измерения) выполняются теоретические исследования, разрабатываются математические модели и программные модули для координатных измерений зубчатых колес. В рамках общего плана НИОКР ЗАО «ЧелябНИИконтроль» на данный момент выполнены ряд основных этапов:

### 1 Конструкторско-технологический этап

Используя принципы модульного проектирования, при разработке новой системы для контроля зубчатых колес в качестве базовой основы принята конструкция двухкоординатного прибора 481KM2, предназначенного для контроля резьбовых калибров. Замена синусного устройства модулем с поворотным столом дала возможность пространственных измерений эвольвентных поверхностей за счет добавления третьей (угловой) координаты (Рис. 1). При этом вращение стола можно осуществлять как в ручном, так и автоматическом режиме. На поворотный стол установлен угловой энкодер RESM и считывающая головка SIGNUM фирмы RENISHAW, позволяющие производить угловое перемещение с точностью позиционирования  $\pm 0,0005\text{мм}$  ( $\pm 0,74$  угловых секунд). Для контроля линейных перемещений измерительной каретки по осям X и Y на приборе установлены две масштабные ленты и считывающие головки фирмы RENISHAW



**Рис. 1 – Конструкция трехкоординатного прибора**

Координаты точек контролируемых поверхностей определяются с помощью высокоточной контактной измерительной головки (ИГ) с двухкоор-

динатным поворотным шарниром, установленной на измерительной каретке. Угловое положение ИГ регулируется в зависимости от условий измерения: прямозубое или косозубое колесо, наружное или внутреннее зацепление. Прибор оснащен наладкой для установки в центра контролируемого вала–шестерни или оправки с зубчатым колесом.

## **2 Разработка методики координатных измерений параметров зубчатого колеса**

В соответствии с Российскими стандартами 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, имеющиеся средств контроля и т.д.

На данный момент разработаны методики координатных измерения для комплексных параметров каждой нормы точности, характеризующих годность зубчатых колес применяемых в среднем машиностроении:

– Для контроля кинематической точности выбран комплекс, состоящий из радиального биения зубчатого венца  $F_r$  (радиальная составляющая) и колебание длины общей нормали  $F_{vwr}$  (тангенциальная составляющая).

– Для контроля норм плавности: отклонения шага  $f_{tr}$  и погрешность профиля  $f_{fr}$ .

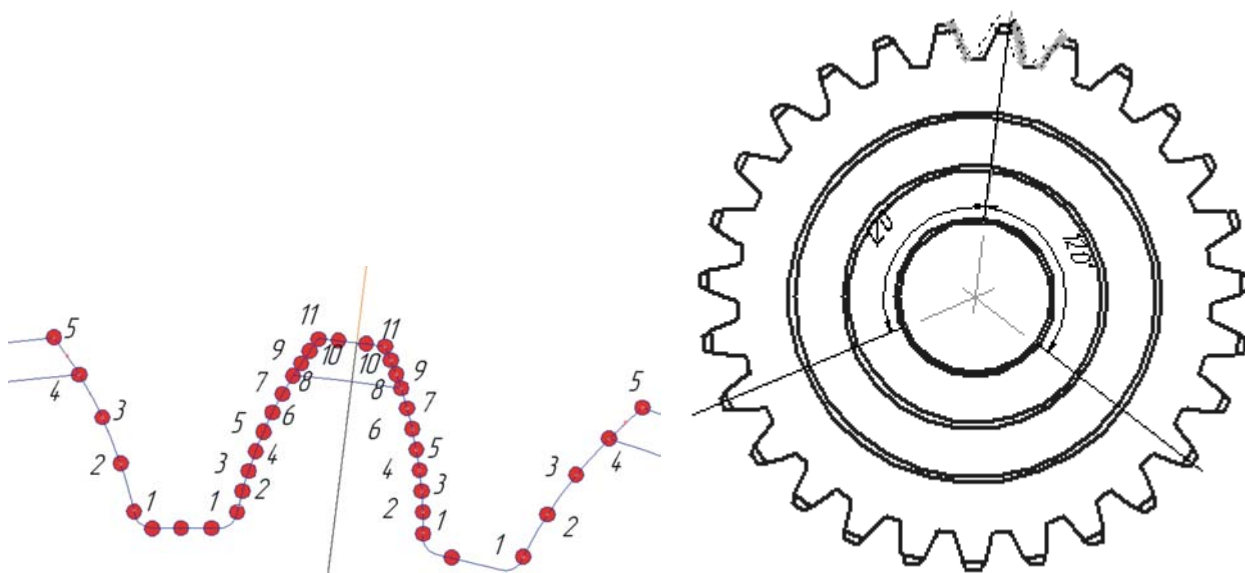
– Для контроля норм контакта зубьев: отклонения направления зуба  $F_{\beta r}$ .

– Для бокового зазора: отклонения длины общей нормали  $E_{wr}$ .

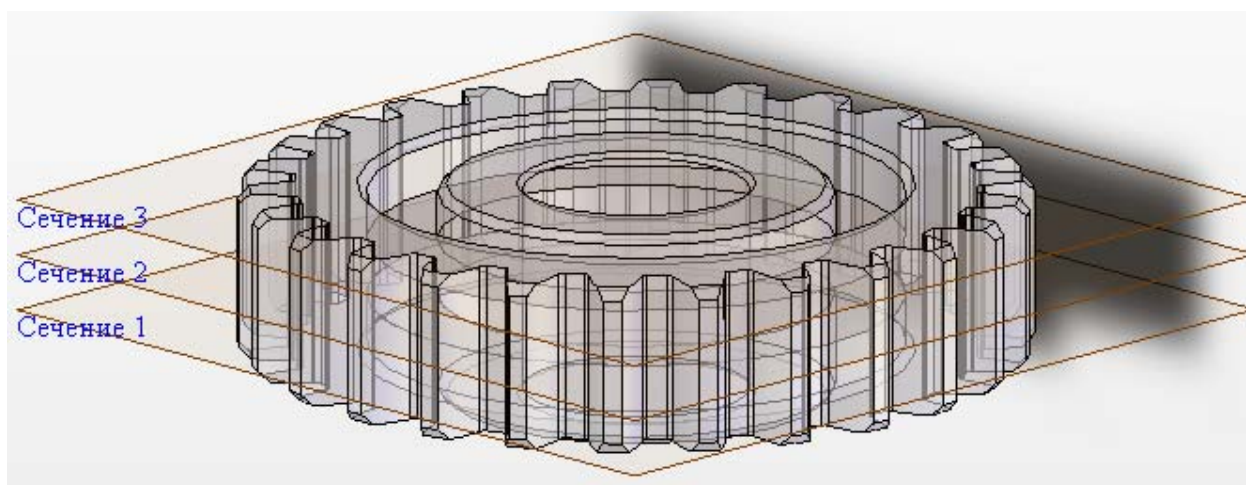
Контроль этих параметров позволяет полностью оценить годность зубчатых колес. В следующих версиях программного обеспечения будут встроены функции, обеспечивающие методики контроля других показателей: накопленная погрешность шага (к шагов) зубчатого колеса  $F_{pr} (F_{kpr})$ ; циклическая погрешность зубцовой частоты в передаче  $f_{zkor}$ ; суммарная погрешность контактной линии  $F_{kr}$ ; отклонение осевых шагов по нормали  $F_{pxnar}$  и т.д.

Процесс контроля на КИМ основан на поочередном измерении координат определенного числа точек и последующих расчетов линейных и угловых размеров при помощи уравнений аналитической геометрии. При этом количество точек должно быть больше или равно минимально необ-

ходимого  $n_i \geq n_{\min}$ . Чем больше количество измеренных точек, тем более точно можно рассчитать параметры измеряемого элемента (возрастает точность оценки погрешности формы). Однако увеличение числа измеренных точек увеличивает время цикла и снижает производительность процесса контроля. В результате компьютерного анализа эвольвентных поверхностей колес с различным числом зубьев и значений модуля, а также с учетом вариации коэффициента смещения было определено, что для контроля зубчатых колес на проектируемом приборе наиболее оптимальной (по соотношению точность/производительность) схемой контроля является измерение по 11 точкам на трех зубьях, расположенным под углом  $120^\circ$  друг к другу, а на остальных – по 5-6 точкам (Рис. 2). Измерения проводятся минимум в трех сечениях (Рис. 3).



**Рис. 2 – Расположение контролируемых точек**



**Рис. 3 – Вариант расположения сечений, в которых производят контроль эвольвентных поверхностей**

Сам процесс измерения осуществляются за счет контакта поверхности сферы измерительного наконечника с поверхностью зуба. Диаметр наконечник выбирается в зависимости от минимального модуля контролируемого колеса. Базовый вариант проектируемых систем НИИК 482 и НИИК483 рассчитан для контроля зубчатых колес модулем от 0,5 мм, следовательно, в комплект измерительных наконечников должны входить наконечники с диаметром сферы от 1 до 10 мм [2]. Каждый наконечник после установки в ИГ калибруются по сфере.

После измерения координат точек необходима математическая обработка данных, при помощи специального программного обеспечения. По координатам точек, принадлежащих реальным геометрическим элементам зубчатого колеса, рассчитывается числовая модель детали или комплекта основных контролируемых поверхностей (например: посадочное отверстие, торец, эвольвентные поверхности) в обобщенной системе координат. Базовое программное обеспечение «ТехноКорд» содержит набор функций и стандартных методик для расчета размеров типовых геометрических элементов, координатных размеров, отклонений формы и расположения поверхностей. В разрабатываемый дополнительный программный модуль «ТехноКорд-Эвольвента» включены новые математические модели и специальные методики для координатных расчетов основных параметров зубчатых колес.

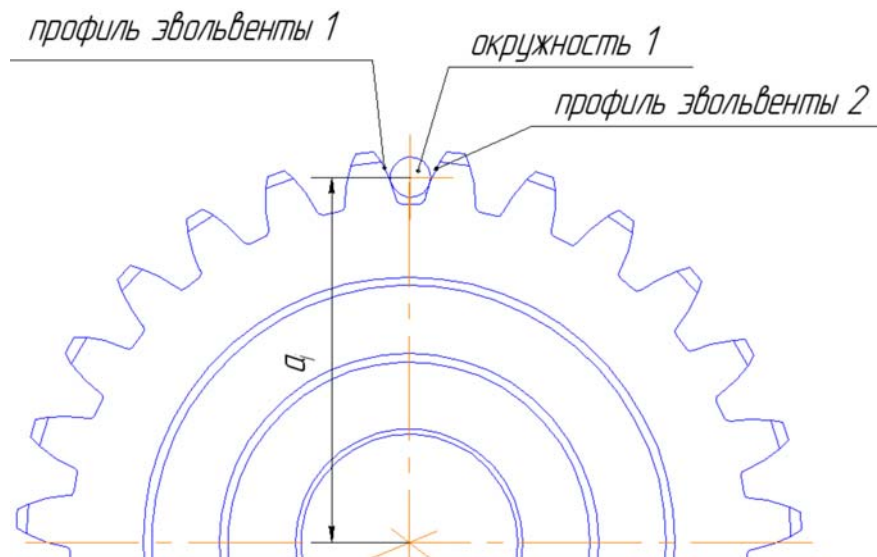
Рассмотрим примеры методики координатных расчетов основных параметров зубчатых колес:

– Для определения величины радиального биения вводится дополнительная окружность, которая математически вписана во впадину колеса касательно одновременно к двум эвольвентным поверхностям (Рис. 4). Диаметр окружности рассчитывается по формуле [3]:

$$d = \frac{\pi m}{2} \cos \alpha_{\delta} , \quad (1)$$

где  $m$  – модуль контролируемого колеса;

$\alpha_{\delta}$  – угол профиля зуба.



**Рис. 4 – Расчетная схема для определения величины радиального биения зубчатых колес**

Расчет величины радиального биения выполняется по формуле:

$$F_r = a_{\max} - a_{\min}, \quad (2)$$

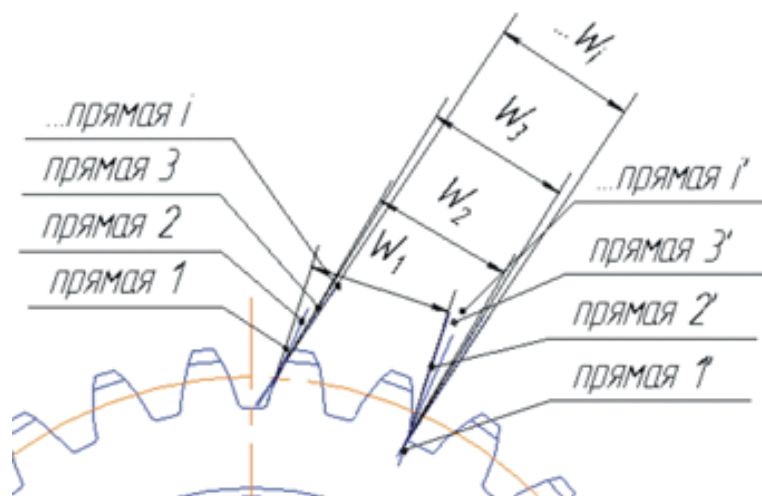
где  $a_{\min}, a_{\max}$  – соответственно минимальное и максимальное расстояние от рабочей оси зубчатого колеса до центра расчетной окружности.

– Для определения величины колебания длины общей нормали вводятся вспомогательные прямые, касательные к эвольвентной поверхности, и после расчета количества охватываемых зубьев строятся параллельные им прямые, касательно к разноименной эвольвентной поверхности (Рис. 5).

$$n = 0,11z + 0,5, \quad (3)$$

где  $n$  – число охватываемых зубьев;

$z$  – число зубьев зубчатого колеса.



**Рис. 5 – Расчетная схема для определения величины колебания длины общей нормали**

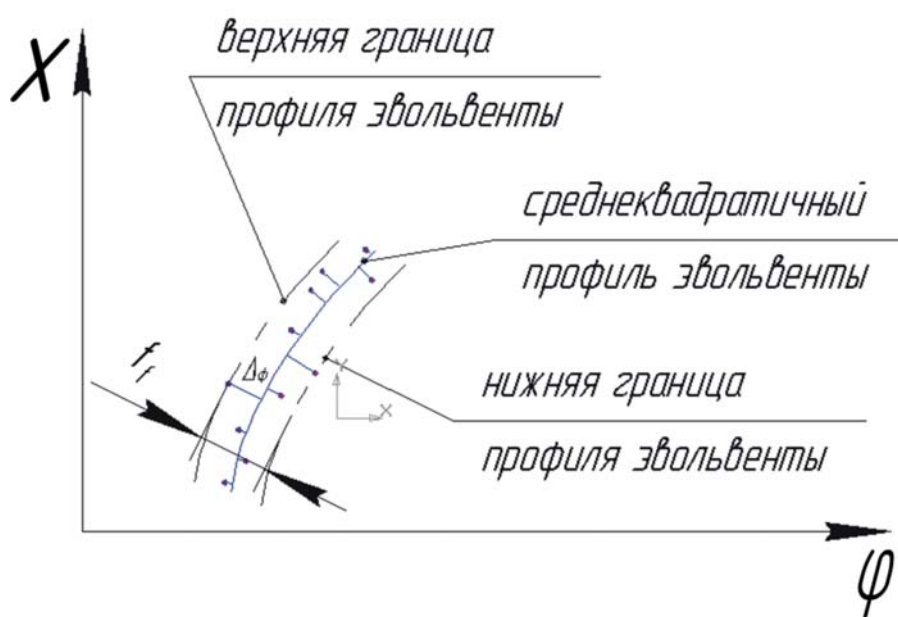
После нахождения всех длин общей нормали выполняется расчет колебания длины общей нормали:

$$F_{vw} = W_{ij \max} - W_{ik \min}, \quad (4)$$

где  $W_{ij \max}$  и  $W_{ik \min}$  – максимальное и минимальное значение длины общей нормали, полученные при измерении зубчатого колеса;

$j$  и  $k$  – номера зубьев, к которым относятся значения параметра.

– Величина погрешности профиля  $f_{fr}$  определяется как расстояние по нормали между двумя ближайшими друг к другу номинальными торцовыми профилями зуба, между которыми размещается действительный торцовый активный профиль зуба зубчатого колеса (Рис. 6).



**Рис. 6 – Расчетная схема для определения величины погрешности формы**

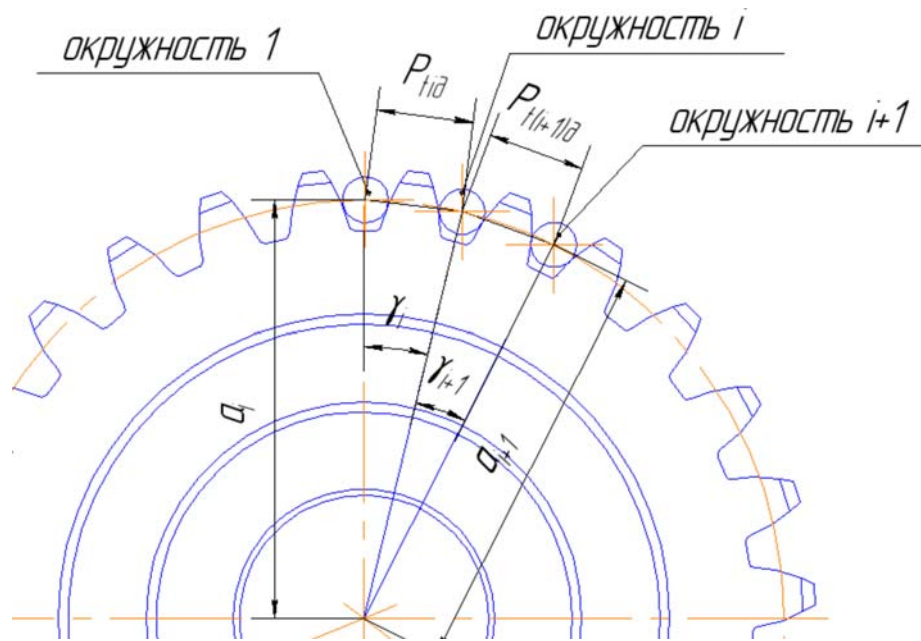
– Для определения величины отклонения шага  $f_{ptr}$  производится расчет торцевого шага и находится разность между полученным значением и действительным значением шага. Величина торцевого шага рассчитывается по формуле:

$$P_{тном} = \pi m, \quad (5)$$

Величина действительного шага определяется при нахождении погрешности радиального биения, как расстояние между центрами вписанных окружностей, касающихся соседних профилей эвольвенты (Рис. 7) и рассчитывается по формуле:

$$P_{ti\delta} = \sqrt{a_i^2 + a_{i+1}^2 - 2a_i a_{i+1} \cos \gamma_i} \quad (6)$$



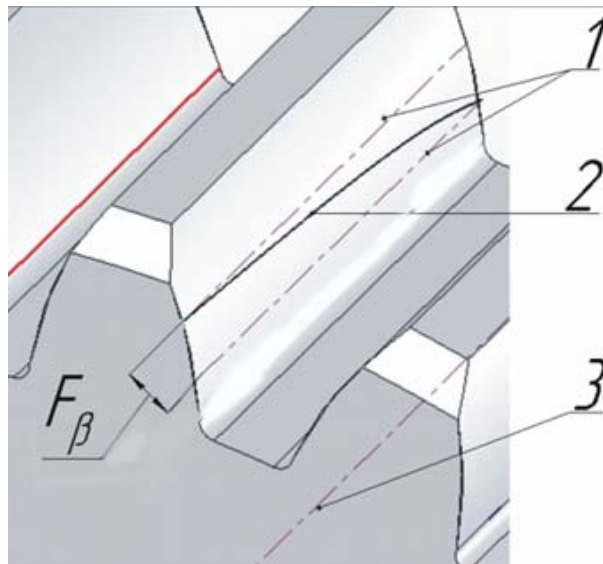


**Рис. 7 – Расчетная схема для определения величины отклонения шага зацепления**

$$f_{pt} = \pm \left( P_{\text{ном}} - \frac{\sum_{i=1}^n P_{ti\alpha}}{Z} \right) \quad (7)$$

– При контроле отклонения направления зуба  $F_{\beta r}$  необходимо знать, погрешность направления зуба прямозубых колес определяется параллельностью боковой поверхности зуба и оси колеса (Рис. 8), в программном обеспечении также предусмотрено построение вспомогательных линий для дальнейшего расчета расстояния между ними и определения, данного параметра. Под действительной линией зуба понимается линия пересечения зубчатого колеса делительным цилиндром, ось которого совпадает с рабочей осью.





- 1– номинальные делительные линии зуба в торцевом сечении,
- 2– действительная линия зуба,
- 3– рабочая ось колеса.

**Рис. 8 – Расчетная схема для определения величины отклонения направления зуба**

– Для контроля величины отклонения длины общей нормали  $E_{Wr}$  необходимо произвести расчет длины общей нормали, а разность значений действительной и номинальной длины общей нормали и будет отклонением.

$$E_{Wr} = W_{ном} - W_{\partial}, \quad (8)$$

$$W_{ном} = [1,476(2n - 1) + 0,01387z]m \quad (9)$$

где  $n$ – количество охватываемых зубьев.

$$W_{\partial} = \frac{\sum_{i=1}^b W_i}{b}, \quad (10)$$

где  $b$  – общее количество измеренных длин общей нормали.

Решается задача компьютерного моделирования одностороннего и двустороннего обката численной модели контролируемого колеса с идеальной моделью парного эталонного колеса для определения показателя кинематической погрешности  $F'_{ir}$ .

Приведенные методики контроля зубчатых колес являются математическим описанием существующих средств измерения, применяемых в поэлементном контроле.

### 3 Разработка информационного обеспечения

Ручное проектирование управляющей программы для выполнения автоматического цикла измерения координат заданных точек, а также подпрограмм расчета заданных параметров контролируемого зубчатого колеса является очень трудоемким процессом, который требует высокой квалификации инженера–метролога. Для повышения эффективности, сокращения времени подготовки и уменьшения ошибок при программировании процесса измерения в разработанное программное обеспечение предусмотрено включить базу данных (БД). В БД содержатся стандартные значения параметров зубчатых колес (ГОСТ 1643-81, 9178-81, 1758-81, 9368-81 и т.д.) и математические схемы их измерения в виде готовых параметрических подпрограмм, которые автоматически выбираются при введении необходимых данных о зубчатом колесе (вид зубчатой передачи/ГОСТ, степень точности, модуль (до 10 мм), делительный диаметр (до 1600мм) и т.д.) (Рис. 8-9). Результаты измерения параметров зубчатых колес сравниваются с стандартными и вывод о их годности оформляется в виде отчета.

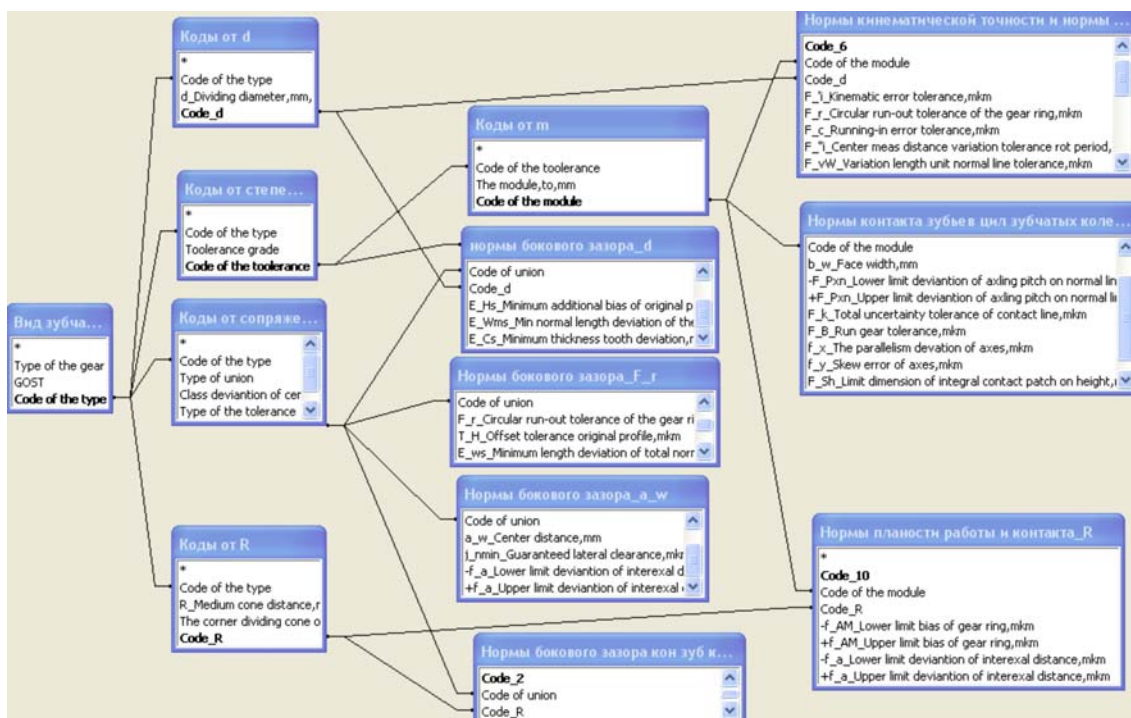


Рис. 8 – Структура базы данных

The image displays a grid of 15 database window screenshots. Each window shows a table with columns and rows of data, typical of a database management system interface. The tables include:

- Нормы плоскости работы и контакта\_R: т...
- Нормы угловой точности и норм...
- Коды от степени точности : таблица
- Нормы плоскости работы\_K : таблица
- Нормы бокового зазора\_а\_ч : таблица
- Коды от сопряжения : таблица
- Нормы контакта зубья цел зубчатых ко...
- нормы бокового зазора\_d : таблица
- Коды от m : таблица
- Нормы бокового зазора\_F\_r : таблица
- Коды от d : таблица
- Нормы контакта зубья в конич колес : та...
- Коды от R : таблица
- Вид зубчатой передачи : таблица

**Рис. 9 – Общий вид таблиц БД**

Необходимо отметить, что программное обеспечение при добавлении параметров контроля зубчатого колеса также будет пополняться математическими схемами их измерения.

В настоящее время изготавливается опытный образец модуля с поворотным столом для проведения опытных испытаний на точность и стабильность работы (срок сдачи март 2007г.).

### Литература

1. Калашников С.Н., Калашников А.С. и др. Производство зубчатых колес: Справочник. – М.: Машиностроения, 1990. – 464 с.
2. Инструкция по эксплуатации эвольвентомера VG 450 -114с.
3. С.Н. Калашников, А.С. Калашников и др. Комплексная автоматизация производства зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1991. – 288с.
4. А.С. Калашников. Технология изготовления зубчатых колес.- М.: Машиностроение, 2004.- 480с.
5. Фингер М.Л. Цилиндрические зубчатые колеса. Теория и практика изготовления.- М.: Научная книга, 2005.– 368с.