

УДК 53.08

**АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ
ПРИ КОНТРОЛЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС
НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ**

М.В. Ушаков¹, И.А. Воробьев¹, С.М. Никольский²

¹ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула, Россия,

²АО «АК «Туламашизавод», Тула, Россия,

tulaumv@yandex.ru,

imsilya@mail.ru,

nikolsky.serge@yandex.ru

Аннотация. В настоящей статье рассматривается подход к построению программных продуктов, предназначенных для обработки информации, получаемой при измерении эвольвентных зубчатых колёс.

Ключевые слова: измерение, контроль, зубчатое колесо, координатно-измерительная машина.

**ALGORITHMIZATION OF THE PROCESS
OF PROCESSING MEASURING INFORMATION
WHEN MONITORING GEARS
ON COORDINATE MEASURING MACHINE**

M.V. Ushakov¹, I.A. Vorobyov¹, S.M. Nikolsky²

¹Tula State University, Tula, Russia,

²JSC Tulamashzavod, Tula, Russia,

tulaumv@yandex.ru,

imsilya@mail.ru,

nikolsky.serge@yandex.ru

Abstract. This article discusses an approach to the construction of software products designed to process information obtained by measuring involute gears.

Keywords: measurement, control, gear wheel, coordinate measuring machine.

При контроле деталей на координатно-измерительных машинах (КИМ) обычно получаемая информация представляет собой набор координат точек соответствующей точности в принятой локальной измерительной системе координат. Эти данные представлены в виде числовых массивов и требуют дополнительной обработки для сравнения с данными, представленными в соответствующих нормативных документах (чертежах, ГОСТах и т.п.).

Одной из подобных задач является определение соответствия результатов измерений параметров зубчатых колёс требованиям ГОСТ 1328-1-2017 [1, 2]. В данной статье рассматривается вопрос оценки результатов измерений только прямозубых колёс эвольвентного зацепления.

При контроле параметров зубчатых колёс на КИМ результаты представляются параметрами (рис. 1) углового шага зубьев φ_z , определяемого относительно центра впадины, и координаты точек контрольной сетки боковых поверхностей зубьев справа и слева в пределах рабочих зон контакта. Обычно данная сетка задаётся шагами Δ_r и Δ_h и определяет количество уровней ($1 \leq i \leq n_h$) и количество точек на уровне ($1 \leq j \leq n_r$). Из полученных при измерении в виде числового файла данных (*.dat) формируется пятимерный массив $A(p, q, i, j, k)$, в котором: p — номер контролируемого зуба колеса ($1 \leq p \leq Z_k$); q — сторона впадины — левая, правая ($1 \leq q \leq 2$); i — количество уровней ($1 \leq i \leq n_h$); j — количество точек на уровне ($1 \leq j \leq n_r$); k — размеры параметров X, Y, Z ($1 \leq k \leq 3$); $k = 1$ — координата X ; $k = 2$ — координата Y ; $k = 3$ — координата Z ; $k = 4$ — отклонение от заданного профиля $\Delta(p, q, i, j, 4)$.

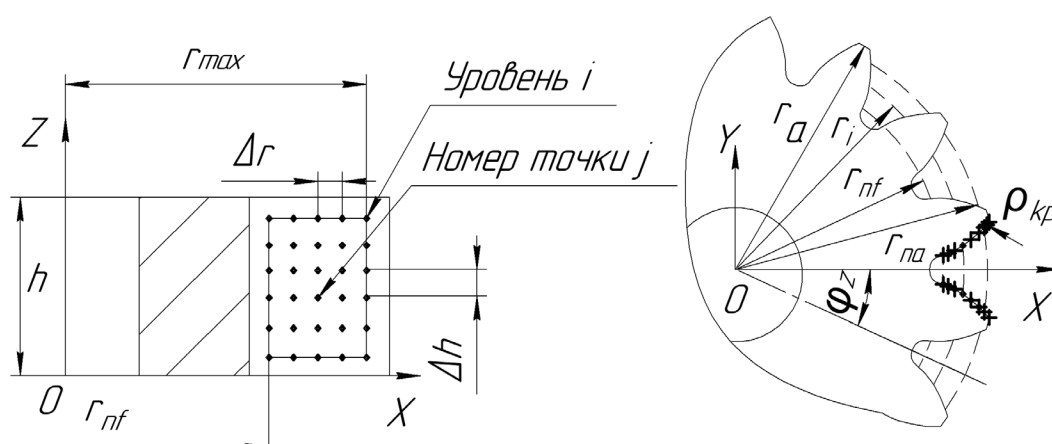


Рис. 1. Формирование контрольной сетки точек на боковой поверхности зуба:
 $XYZ0$ — локальная измерительная система координат; r_a — наружный радиус колеса;
 ρ_{kp} — радиус скругления при вершине зуба; r_{na}, r_{nf} — границы контролируемой зоны;
 h — толщина колеса; $\Delta h, \Delta r$ — шаги сетки точек контроля

Если уровни измерений лежат параллельно плоскости XOY локальной измерительной системы координат, то начальной операцией преобразования является определение отклонений измеряемых сечений от заданной эвольвентной формы. В этом случае следует определить координаты исходной эвольвенты в пределах заданных границ. Параметры z_k, a_n (угол зацепления), h, r_a и r_{na} должны приходить как исходная информация совместно с результатами измерений $A(p, q, i, j, k)$.

Заданный профиль боковой поверхности зубьев (рис. 2) будет определяться положением эвольвенты, проходящей через середину поля допуска, определяемого параметрами E_{H_s} и T_H .

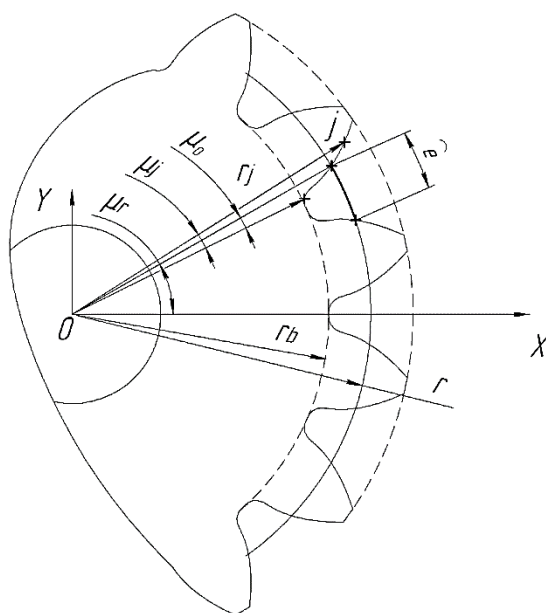


Рис. 2. Определение координат эталонного профиля: r — радиус делительной окружности; r_b — радиус основной окружности; r_j — радиус текущей точки; μ_0, μ_r, μ_j — угловые параметры

Математически он будет определяться зависимостями [3]:

$$r = m_n z_k / 2; \quad r_b = r \cos a_n; \quad \cos a_{j0} = \frac{r_b}{r_{j0}};$$

$$\mu_0 = \text{inv } a_n = \text{tg } a_n - a_n; \quad \mu_{j0} = \text{inv } a_{j0} = \text{tg } a_{j0} - a_{j0}, \quad (1)$$

$$S_b = \frac{\pi m_n}{2} - 2 \left(\chi m_n + E_{H_s} - \frac{T_H}{2} \right) \text{tg } \alpha_n; \quad \mu_r = \frac{\hat{e}}{2r};$$

$$\begin{cases} X_{\text{э}} = r_j \cos(\mu_r - \mu_0 + \mu_{j0}); \\ Y_{\text{э}} = r_j \sin(\mu_r - \mu_0 + \mu_{j0}); \\ z_{\text{э}} = \text{val}, \end{cases} \quad (2)$$

где a_n — нормальный угол зацепления (обычно 20°); m — модуль; z_k — число зубьев колеса; r — радиус делительной окружности; r_b — радиус основной; r_{j0} — радиус рассматриваемой точки эвольвентного профиля; a_{j0} — угол зацепления рассматриваемой точки эвольвентного профиля; χ — коэффициент коррекции; e — окружная ширина впадины стандартного исходного контура; E_{H_s} — наименьшее дополнительное смещение исходного контура (обычно < 0); T_H — допуск на смещение исходного контура; $X_{\text{э}}, Y_{\text{э}}$ — параметры эталонной эвольвенты.

Погрешности изготовления зубьев при матричном задании точек контроля $\Delta(p, q, i, j, k)$ будут определяться как отклонения от заданной эвольвентной поверхности, то есть по нормали к поверхности по направлению радиуса кривизны, что выражается зависимостями (рис. 3):

$$\begin{aligned} r_j &= \sqrt{X_j^2 + Y_j^2}; & \operatorname{tg} \mu_j &= \frac{Y_j}{X_j}; & \cos \alpha_j &= \frac{r_b}{r_j}; \\ \alpha_j + \mu_j &= \mu_r - \mu_0 + \operatorname{tg} \alpha_{j0}; \\ \operatorname{tg} \alpha_{j0} &= \alpha_j + \mu_j - \mu_r + \mu_0; \\ \Delta(p, q, i, j, 4) &= r_b(\operatorname{tg} \alpha_j - \operatorname{tg} \alpha_{j0}), \end{aligned} \quad (3)$$

где r_j — радиус положения контрольной точки в локальной измерительной системе координат по результатам измерений; α_j — угол зацепления контрольной точки; μ_j — угол положения контрольной точки в локальной измерительной системе координат относительно оси X по результатам измерений.

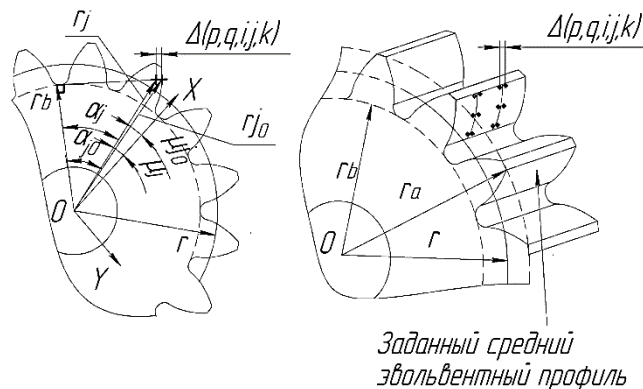


Рис. 3. Схема определения погрешностей боковой поверхности зуба относительно заданного среднего эвольвентного профиля: r_{j0} — радиус точек среднего эвольвентного профиля; α_{j0} — угол зацепления точек среднего эвольвентного профиля; r_j — радиус контрольных точек; α_j — угол зацепления контрольных точек

В зависимости от положения контрольной точки относительно среднего эталонного профиля $\Delta(p, q, i, j, 4)$ может принимать как положительное, так и отрицательное значение.

Однако по полученным значениям погрешностей трудно определить их соответствие основным показателям норм кинематической точности, плавности и контакта ГОСТ 1328-1-2017. Кроме этого, определение положения оси X локальной измерительной системы координат обладает значительными погрешностями, связанными со случайным выбором первой впадины, относительно центра которой формируется система координат и производится отсчёт погрешностей, а также от накопления погрешностей, связанных с переходом к последующим локальным измерительным системам координат, что обусловлено их поворотом на угол:

$$\varphi_{pi} = \varphi_z (p_i - 1); \quad \varphi_z = \frac{2\pi}{Z_K}, \quad (4)$$

где p_i — номер впадины между зубьями, в которой проводится контроль; φ_z — угловой шаг зубьев.

Для более рациональной оценки указанных выше погрешностей $\Delta(p, q, i, j, 4)$ рекомендуется их представить в виде суммы двух составляющих (рис. 4):

$$\Delta(p, q, i, j, 4) = \Delta(p, q, i, j, 5) + \Delta(p, q, i, j, 6), \quad (5)$$

где $\Delta(p, q, i, j, 5)$ — отклонение положения контрольных точек одного из уровней относительно аппроксимирующей эвольвенты; $\Delta(p, q, i, j, 6)$ — отклонение положения аппроксимирующей эвольвенты от заданной средней эвольвентной поверхности.

В этом случае погрешность $\Delta(p, q, i, j, 5)$ будет отражать местную контрольную погрешность профиля Δ_K , а погрешность $\Delta(p, q, i, j, 6)$ — местную контрольную погрешность шага Δ_{pK} для заданного конкретного уровня контроля с параметрами p, q, i, j .

Аппроксимация параметров результатов контроля точек рассматриваемого уровня производится за счёт поворота $\Delta\mu_j$ эвольвенты средней эвольвентной поверхности в направлении положения контрольных точек до получения одинаковых по абсолютной величине их максимальных положительных и отрицательных отклонений (рис. 4).

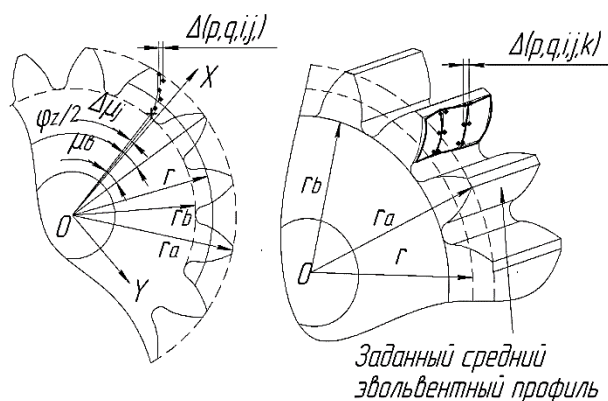


Рис. 4. Разложение основной погрешности контроля на составляющие:

μ_b — положение начала заданного среднего эвольвентного профиля на основной окружности; $\Delta\mu_j$ — угловое отклонение положения аппроксимирующей эвольвенты от заданной средней эвольвентной поверхности

Расстояние от аппроксимирующей эвольвенты до контрольных точек $\Delta(p, q, i, j, 6)$ можно определить как:

$$\Delta(p, q, i, j, 5) = r_b \{ \operatorname{tg} \alpha_j - \operatorname{tg} (\alpha_{j0} + \Delta\mu_j) \}, \quad (6)$$

при этом изменение положения ($\Delta\mu_j$) для каждого уровня i производится до получения:

$$ABS(\Delta(p, q, i, j, 5)_{\max}) = ABS(\Delta(p, q, i, j, 5)_{\min}).$$

Погрешность, связанная с отклонением положения аппроксимирующей эвольвенты от заданной средней эвольвентной поверхности, равна

$$\Delta(p, q, i, j, 6) = r_b \{ \operatorname{tg}(\alpha_{j0} + \Delta\mu_j) - \operatorname{tg} \alpha_{j0} \}. \quad (7)$$

Для исключения исходной погрешности — установления начального положения локальной измерительной системы координат, для уточнения результатов измерений следует после определения погрешностей $\Delta(p, q, i, j, 4)$ для всех измеряемых поверхностей колеса произвести смещение её положения на угол $\Delta\phi$, по (3) и путём перебора получить такое смещение $\Delta\phi$, сумма квадратов всех отклонений которого была бы минимальной

$$\sum_{p=1}^{Z_k} \sum_{q=1}^2 \sum_{i=1}^{n_h} \sum_{j=1}^{n_r} (\Delta(p, q, i, j, 4))^2 = \min.$$

После данной процедуры производится расчёт погрешностей $\Delta(p, q, i, j, 5)$ и $\Delta(p, q, i, j, 6)$.

Данная методика позволит разрабатывать модули управляющих программ для КИМ, предназначенных для измерения параметров зубчатых колёс, которые, в отличие от представленных, например, в работах [4, 5], не оснащены специализированным программным обеспечением, а также специализированными приспособлениями (поворотные столы и т.п.).

Список литературы

1. ГОСТ ISO 1328-1-2017. Передачи зубчатые цилиндрические. Система ISO. Классификация допусков на боковые поверхности зубьев. Часть 1. Определения и допускаемые значения отклонений на боковые поверхности зубьев зубчатого колеса. — М.: Стандартиформ, 2018.
2. ГОСТ 13755-2015 (ISO 53:1998). Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходные контуры. — М.: Стандартиформ, 2016.
3. ГОСТ 16532-70. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчёт геометрии. — М.: Издательство стандартов, 1983.
4. Сурков И.В. Автоматизация контроля параметров зубчатых колёс и передач // Станкоинструмент. — 2016. — № 1. — С.80–87.
5. Сурков И.В., Буртовая А.И. Разработка математического обеспечения для размерноточностного анализа результатов координатных измерений // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. научных трудов. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. — С. 101–104.

Статья поступила в редакцию: 29.07.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 22.08.2022 г.

Статья принята в работу: 24.08.2022 г.