

Excel – модуль расчета параметров точности обработки сложноконтурных деталей Усачев Ю. И.¹, Истомин А. Б.²

¹Усачев Юрий Ильич / Usachev Yuriy Ilich – кандидат технических наук, доцент;

²Истомин Александр Борисович / Istomin Alexander Borisovich – старший преподаватель,
кафедра технологии машиностроения,
факультет машиностроительных технологий,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

Аннотация: в статье рассмотрен пример выполнения практических работ по моделированию и анализу точности обработки деталей сложного контура. Предлагаемый модуль MS Excel позволяет сократить время обработки результатов измерений типовых профилей деталей.

Abstract: the article describes the example of the practical work on the modeling and analysis of precision machining complex contour. The proposed module MS Excel allows you to shorten the time of processing the results of measurements of standard profiles details.

Ключевые слова: точность обработки, обработка результатов измерения, алгоритм определения параметров точности.

Keywords: precision machining, processing of measurement results, an algorithm for determining the parameters of accuracy.

Критериями, по которым оценивается степень соответствия номинального и реального профиля (контура) деталей, являются точность размеров, формы, расположения [1, 2]. Известно, что в процессе обработки профиля деталей за счет различных, в том числе случайных технологических факторов, точки реальной поверхности не совпадают с соответствующими точками поверхности, заданной в управляющей программе, а имеют отклонения от них. Совокупность отклонений представляют в виде

векторного поля, каждый из векторов которого $\Delta\Sigma_k$ берет начало на заданной поверхности (контуре), направлен в сторону отклонения и равен ему по модулю [2]. Для разделения суммарного отклонения профиля разработано достаточно большое количество методов, которые могут быть условно разделены на два. Для первого из них параметры точности определяются по характеристикам двух прилегающих контуров, эквидистантных заданному номинальному профилю, а для второго реальный контур представляется геометрически подобным идеальному, рассматривая его следствием гомотетных преобразований.

Второй метод реализован в виде методики, разработанной на кафедре «Технология машиностроения» МГТУ им. Н. Э. Баумана доц., к. т. н. М. С. Камсюком. Он используется в учебном процессе при решении практических задач технологии машиностроения. Одну из них сформулируем следующим образом.

Определить точность размеров (коэффициент растяжения усредненного контура K); точность формы (минимальное среднеквадратичное отклонение σ реального контура от усредненного); точность расположения (вектор смещения центра масс Δ_{cm} реального контура и угол ψ его поворота) для контура детали, заданной двумя дугами окружности, если векторные поля отклонений, вызываемых действием первичных погрешностей обработки $\{\bar{\Delta}_{ik} (i = 1 \dots, l)\}$.

Исходные данные: геометрические параметры номинального контура – координаты точек номинального контура $Z_k(x_k, y_k)$; векторные поля отклонений, которые могут быть рассчитаны в процессе оценки влияния технологических факторов на суммарную погрешность обработки [2, 3]. В таблице 1 приведен алгоритм решения данной задачи.

Таблица 1. Алгоритм решения

№ этапа	Содержание	Расчетные зависимости
1	Определение координат центра тяжести $O(X, Y)$ номинального контура	$X = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k; Y = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k$
2	Определение координат центра тяжести $\tilde{O}(\tilde{U}, \tilde{V})$ реального контура	$\tilde{U} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \tilde{u}_k; \tilde{V} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \tilde{v}_k$

3	Определение расчетных параметров	$I = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k^2 + y_k^2);$ $P = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\tilde{u}_k x_k + \tilde{v}_k y_k);$ $J = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\tilde{u}_k^2 + \tilde{v}_k^2);$ $S = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\tilde{v}_k x_k - \tilde{u}_k y_k);$
4	Решение системы уравнений относительно $\alpha, \beta, \gamma, \delta$.	$\begin{vmatrix} I & 0 & X & Y \\ 0 & I & -Y & X \\ X & -Y & 1 & 0 \\ Y & X & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P \\ S \\ \tilde{U} \\ \tilde{V} \end{vmatrix}$
5	Определение коэффициента растяжения усредненного контура (погрешности размера)	$K = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$
6	Определение минимального среднеквадратичного отклонения (погрешности формы)	$\sigma = \sqrt{\begin{aligned} &(\alpha^2 + \beta^2)I + \gamma^2 + \delta^2 \\ &- 2\alpha P - 2\beta S - 2\gamma\tilde{U} - \\ &2\delta\tilde{V} + 2(\alpha\gamma + \beta\delta)X \\ &+ 2(\alpha\delta - \beta\gamma)Y + J \end{aligned}}$
7	Расчет смещения центра тяжести реального контура	$\Delta_{cm} = \sqrt{(X - \tilde{U})^2 + (Y - \tilde{V})^2}$
8	Определение угла, характеризующего направление смещения центра тяжести	$\psi = \arctg \frac{\tilde{V} - Y}{\tilde{U} - X}.$
9	Определение угла поворота реального контура	$\varphi = \arccos \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}$

Учитывая значительный объем вычислений для одного профиля детали, задачу оценки точности по заданному алгоритму удобно решать с привлечением методов MS Excel. Это объясняется доступностью офисного приложения и достаточно быстрой реализацией методики в указанной среде. Для освоения рассматриваемой методики определения параметров точности сложноконтурных деталей и простоты расчета координат контролируемых точек номинального и реального контуров (в объеме одного практического занятия) примем, что уравнения кривых, описывающих контур детали, имеют вид

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 &= R^2; \\ x^2 + (y + a)^2 &= R_1^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где R – радиус окружности, центр которой имеет координаты $O(0,0)$;

R_1 – радиус окружности, центр которой имеет координаты $O(0,-a)$.

Найдем координаты точек пересечения дуг окружностей, совместно решая два уравнения (1). Тогда

$$y_1 = \frac{R^2 - R_1^2 + a^2}{2a};$$

$$x_1 = D; x_2 = -D;$$

$$D = \sqrt{R^2 - y^2}.$$
(2)

Максимальный размер контура вдоль оси x равен
 $L = 2R$, если $y_1 > 0$; $L = 2D$, если $y_1 < 0$.

Определим координаты y_{ki} номинального контура при шаге контроля по оси x $h=L/10$. Следует учесть, что количество контролируемых точек зависит от размеров обрабатываемого профиля. Значения

y_{ki} в зависимости от принадлежности точки одной из дуг окружности найдем из уравнений (1)

$$y_{ki} = \sqrt{R^2 - x_{ki}^2};$$

$$y_{ki} = a - \sqrt{R_1^2 - x_{ki}^2}$$
(3)

Зададим суммарные значения отклонений точек профиля по нормали к контуру, например, в виде зависимости (считая, что в каждой контролируемой точке значение получено или по результатам измерений, или при суммировании элементарных погрешностей).

Координаты контролируемых точек реального контура можно определить по уравнениям

$$u_{ki} = (x_{ki} + \bar{\Delta}_{ik}) \cdot \cos \gamma_i;$$

$$v_{ki} = (y_{ki} + \bar{\Delta}_{ik}) \cdot \sin \gamma_R;$$

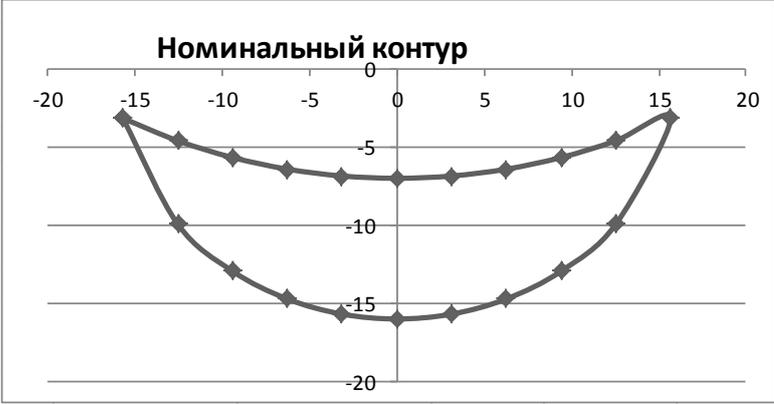
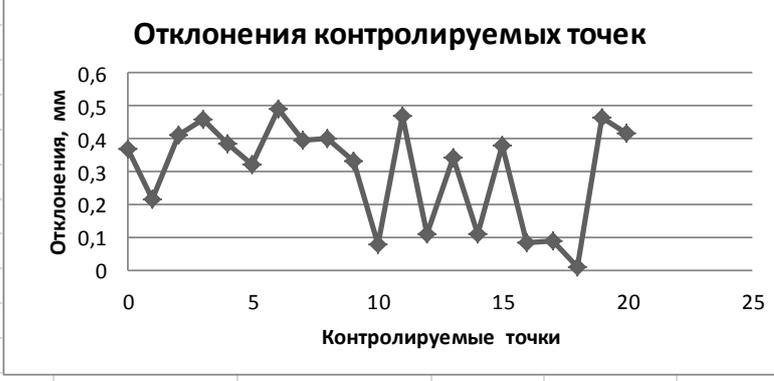
$$v_{ki} = (y_{ki} + \bar{\Delta}_{ik}) \cdot \sin \gamma_{R1} - a,$$
(4)

где γ_i определяется в зависимости от принадлежности контролируемой точки одной из дуг окружностей по формулам

$$\gamma_R = \arctg\left(\frac{y_{ki}}{x_{ki}} + \pi\right); \gamma_{R1} = \arctg\left(\frac{a - y_{ki}}{x_{ki}} + \pi\right),$$
(5)

Пример решения задачи с привлечением методов MS Excel приведен ниже. Функция, которая определяет значения отклонений точек реального контура, примем в виде $f = b + 0,5 \cdot \text{СЛЧИСЛ}()$, где встроенная функция MS Excel СЛЧИСЛ() представляет собой генератор случайных чисел в диапазоне от 0 до 1.

Для получения значений коэффициентов α , β , γ , δ используем функцию =МУМНОЖ(МОБР(A88:D91);H94:H97) (Рис. 1.). При этом перед вводом формулы выделяются ячейки F88:F91, далее курсор устанавливается в строку формул и для ввода формулы используется не как обычно клавиша <Enter>, а комбинация клавиш <Ctrl>+<Shift>+<Enter>.

Исходные данные						
Вариант	R	R1	a	f	b	c
8	16	34	27	$b+c*\text{СЛЧИС}()$	0	0,5
Определение координат пересечения окружностей						
R – радиус окружности, центр которой имеет координаты O(0,0);						
R ₁ – радиус окружности, центр которой имеет координаты O(0,-a)						
Y		X1	X2	R		16
-3,17		15,684	-15,684	R1		34
				a		27
Шаг контроля h, мм	h=L/10=		3,137			
Определение координат контролируемых точек номинального контура						
X _{ki}	Y _{ki}		<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;">   </div>			
-15,6835	-3,167					
-12,5468	-4,6					
-9,4101	-5,672					
-6,2734	-6,416					
-3,1367	-6,855					
0	-7					
3,1367	-6,855					
6,2734	-6,416					
9,4101	-5,672					
12,5468	-4,6					
15,6835	-3,167					
12,5468	-9,929					
9,4101	-12,94					
6,2734	-14,72					
3,1367	-15,69					
0	-16					
-3,1367	-15,69					
-6,2734	-14,72					
-9,4101	-12,94					
-12,5468	-9,929					
-15,6835	-3,167					

Координаты контролируемых точек реального контура							
n	$\Delta ik, \text{мм}$	$\gamma, \text{рад}$	$u_i, \text{мм}$	$v_i, \text{мм}$			
0	0,3712	2,0502	-15,8547	-2,8373			
1	0,2136	1,9488	-12,6256	-4,4018			
2	0,4119	1,8512	-9,5241	-5,2760			
3	0,4611	1,7564	-6,3585	-5,9631			
4	0,3829	1,6632	-3,1720	-6,4738			
5	0,3237	1,57	0,0003	-6,6763			
6	0,4894	1,4163	3,2120	-6,3714			
7	0,3936	1,275	6,3881	-6,0398			
8	0,3983	1,1553	9,5709	-5,3075			
9	0,3335	1,0602	12,7098	-4,3093			
10	0,0765	-0,1992	15,7585	-3,1818			
11	0,4701	5,6138	12,9154	-10,2203			
12	0,1089	5,3411	9,4742	-13,0283			
13	0,3429	5,1153	6,4078	-15,0343			
14	0,1071	4,9097	3,1577	-15,7945			
15	0,3803	4,7124	0,0000	-16,3803			
16	0,0806	4,5151	-3,1525	-15,7686			
17	0,0866	4,3095	-6,3074	-14,7986			
18	0,0104	4,0836	-9,4162	-12,9486			
19	0,4635	3,811	-12,9102	-10,2162			
20	0,4166	3,3408	-16,0918	-3,2491			
Координаты центра тяжести номинального контура							
$X = 0$			$P = 188,056$				
$Y = -9,14873$			$I = 186,916$				
Координаты центра тяжести реального контура							
$\tilde{U} = 0,01367$			$S = -0,19424$				
$\tilde{V} = -9,05139$			$J = 189,308$				
Матрица коэффициентов				Неизвестные		Свободные члены	
186,92	0,00	0,00	-9,15	α	1,0197	P	188,0565
0,00	186,92	9,15	0,00	β	-0,0031	S	-0,1942
0,00	9,15	1,00	0,00	γ	0,0420	$U \sim$	0,0137
-9,15	0,00	0,00	1,00	δ	0,2774	$V \sim$	-9,0514
Погрешность размера				Смещение центра тяжести реального контура			
$K = 1,01968$				$\Delta_{см} = 0,098295962$			
Погрешность формы				Угол поворота реального контура			
$\sigma = 0,24238$				$\varphi = 0,003033837$			

Буфер обмена		Шрифт		Выравнивание		Число		
F74		fx		{=МУМНОЖ(МОБР(A74:D77);H74:H77)}				
A	B	C	D	E	F	G	H	I
72								
73	Матрица коэффициентов			Неизвестные		Свободные члены		
74	186,92	0,00	0,00	-9,15	α	1,0197	P	188,0565
75	0,00	186,92	9,15	0,00	β	-0,0031	S	-0,1942
76	0,00	9,15	1,00	0,00	γ	0,0420	$U \sim$	0,0137
77	-9,15	0,00	0,00	1,00	δ	0,2774	$V \sim$	-9,0514
78								
79	Погрешность размера			Смещение центра тяжести реального контура				
80	K= 1,01968			$\Delta_{см} = 0,098295962$				
81	Погрешность формы			Угол поворота реального контура				
82	$\sigma = 0,24238$			$\varphi = 0,003033837$				

Рис. 1. Фрагмент Excel программы

Пример реализации одного из вариантов задания выполнения практических (домашних) работ по моделированию и анализу точности обработки сложноконтурных деталей показал, что использование предлагаемого программного модуля MS Excel позволяет сократить процедуру обработки результатов измерений для типовых профилей деталей. Данный модуль может быть применен при производственном контроле деталей сложного контура.

Литература

1. Технология машиностроения: В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / В. М. Бурцев, А. С. Васильев, А. М. Дальский и др.; Под ред. А. М. Дальского. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 564 с.
2. Технологические расчеты при курсовом и дипломном проектировании в технологии механосборочного производства / Под ред. Борисова В. В., Спиридонова О. В. – М.: Изд-во МГТУ, 1993. – 136 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / ред. Дальский А. М., Косилова А. Г., Мещеряков Р. К., Суслов А. Г. - 5-е изд., испр. - М.: Машиностроение: Т. 1. - 2003. - 912 с.