

АЛГОРИТМ ІНФОРМАЦІЙНОГО СИНТЕЗУ ТРАЄКТОРІЇ ПЕРЕМІЩЕННЯ КРУГЛОГО РОБОЧОГО ІНСТРУМЕНТА З ДУГОПОДІБНОЮ ШЛІФУВАЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ



А.І. Чащін, докт. техн. наук,
В.В. Науменко

Принципово новий напрям у конструюванні суперпрецизійних верстатів із пристроями інформаційного керування [1], який має забезпечувати жорстку радіальну [2] й осьову [3] стабілізацію, потребує розробки алгоритмів інформаційного синтезу траєкторій переміщення робочого інструмента для досягнення точності обробки виробів, обчислюваної одиницями сотих мікрометра. Таких точностей досягти без інформаційних технологій управління зі зворотним зв'язком неможливо. Отже, необхідна розробка не тільки технічних засобів, але й інформаційних алгоритмів для їхнього управління.

1. Принципи синтезу інформаційного алгоритму траєкторії переміщення шліфувального круга з дугоподібною шліфувальною поверхнею

Для обробки криволінійних виробів обертання їхня вісь Y у системі координат XOY суміщають з віссю обертання вала шпindelної опори і задають поліномом n -го степеня

$$Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \dots + a_n X^n \quad (1)$$

Огинальна дугоподібною поверхні шліфувального круга (у перерізі круга площиною, що проходить через його площину симетрії), що знаходиться між нижньою точкою шліфувального круга (точка O_1 , рис. 1) і крайньою точкою огинальної дугоподібною поверхні

(точка D) у системі координат $X_1O_1Y_1$ огинальної дугоподібною поверхні шліфувального круга описується поліномом k -го степеня

$$Y_{1oz.} = b_0 + b_1 X_{1oz.} + b_{2oz.} X_{1oz.}^2 + \dots + b_n X_{1oz.}^k \quad (2)$$

Обробка деталі виконується на двокоординатному шліфувальному верстаті (див. рис. 1), елементи формотворної системи якого забезпечують дискретне переміщення шліфувального круга по траєкторії його переміщення із заданим кроком m мікропереміщення по координаті X і синхронне з ним переміщення по координаті Y . Під час такого переміщення

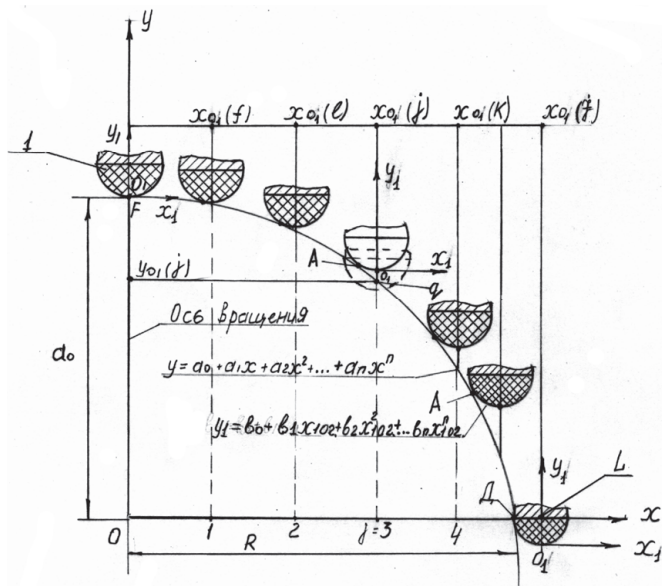


Рис.1. Траєкторія переміщення шліфувального круга з дугоподібною шліфувальною при виготовленні деталі криволінійного перерізу

шліфувального круга не змінюється орієнтація його огинальної дугоподібної поверхні, заданої поліномом (2).

Установимо шліфувальний круг у початкову точку траєкторії переміщення. Для цього нижню точку шліфувального круга O_1 сумістимо з віссю обертання вала шпindelної опори і в системі координат XOY задамо координаті Y нижньої точки шліфувального круга значення $Y_{O_1} = a_0$ відповідно до (1). У процесі виготовлення деталі, осьовий переріз якої задано поліномом, шліфувальний круг необхідно переміщувати так, щоб на кожному j -му кроці m -го мікропереміщення нижньої точки O_1 шліфувального круга в напрямку півосі $+OX$ системи координат XOY координата Y_{O_1} нижньої точки O_1 приймала б таке значення, щоб огинальна дугоподібної поверхні шліфувального круга, задана поліномом (2), мала одну спільну точку з поверхнею, заданою поліномом (1).

Таким чином, завдання побудови траєкторії переміщення шліфувального круга зводиться до завдання побудови траєкторії переміщення нижньої точки шліфувального круга, при якій кожному дискретному значенню координати $X_{O_1}(j)$ нижньої точки в системі координат XOY відповідає дискретне значення координати $Y_{O_1}(j)$ нижньої точки, при якій криві, що задані поліномами (1) і (2) мають одну спільну точку, тобто доторкаються. Як видно з рис. 1, при такій траєкторії переміщення нижньої точки шліфувального круга на кожному проході формоутворення здійснюється половиною площі дугоподібної поверхні шліфувального круга. Для побудови полінома (2), що наближає дугоподібну шліфувальну поверхню, у системі координат $X_2O_2Y_2$ (рис. 2) вимірюються координати n точок, що належать огинальній дугоподібної поверхні. Координати цих n точок огинальної наближають, наприклад, ортогональним поліномом Чебишева, не вище $(n - 1)$ -го степеня. За отриманим поліномом визначаються

координати нижньої точки цієї огинальної (нижньої точки шліфувального круга) у системі координат $X_2O_2Y_2$.

Початок O_1 системи координат $X_1O_1Y_1$ (див. рис. 2), осі якої паралельні осям системи координат $X_2O_2Y_2$, суміщається з нижньою точкою огинальної. Записується поліном, що наближає огинальну шліфувальну поверхню (у системі $X_1O_1Y_1$ координат); одержують поліном (2). А далі будується траєкторія переміщення нижньої точки шліфувального круга така, що в кожен момент часу переміщення шліфувального круга оброблювана деталь, осьовий переріз якої заданий поліномом (1), і огинальна дугоподібної поверхні, задана поліномом (2), мають одну спільну точку. Нехай у процесі шліфування формотворна точка (див. рис. 1) переміщується по огинальній із точки O_1 у точку D . При цьому нижня точка O_1 шліфувального круга по осі X системи координат XOY переміщається з точки $X_{O_1} = 0$ в точку $X_{O_1}(j)$ на відстань $OL = mn_j$, де n_j – число кроків мікропереміщень нижньої точки з кроком m .

Візьмемо на відрізку осі X системи коор-

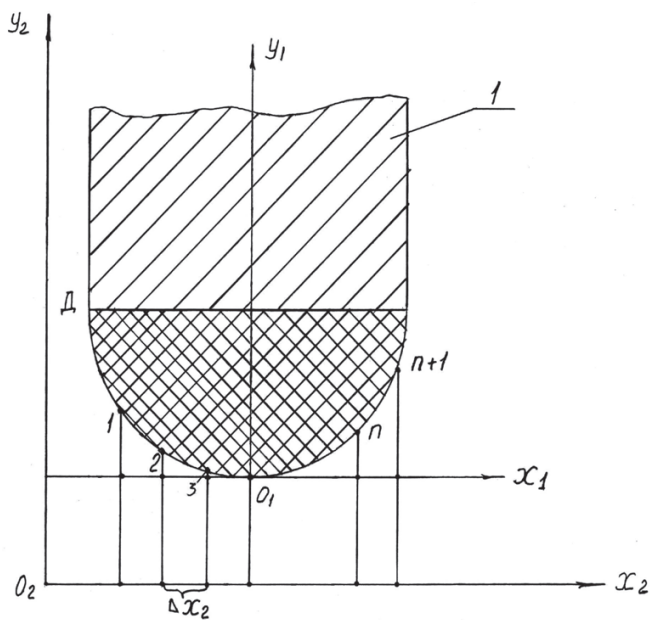


Рис.2. До побудови полінома, що наближає дугоподібну шліфувальну поверхню шліфувального круга

динат XOY (рис. 1), рівному відстані OL , n рівновіддалених точок, наприклад, $n = 5$: f, l, k, j, J , що знаходяться від початку системи координат на відстанях відповідно $X_{o_1}(f) = mn_f$, $X_{o_1}(k) = mn_k$, $X_{o_1}(l) = mn_l$, $X_{o_1}(j) = mn_j$, $X_{o_1}(J) = mn_J$, де n_f, n_k, n_l, n_j, n_J – числа мікропереміщень нижньої точки шліфувального круга від осі обертання в дану точку з кроком мікропереміщення m . Координату X нижньої точки шліфувального круга послідовно приймають рівною $X_{o_1}(f), X_{o_1}(k), X_{o_1}(l), X_{o_1}(j), X_{o_1}(J)$. Для кожного значення координати X нижньої точки шліфувального круга за методом простих ітерацій розраховують координати Y цієї точки $Y_{o_1}(f), Y_{o_1}(k), Y_{o_1}(l), Y_{o_1}(j), Y_{o_1}(J)$, при яких криві, задані поліномами (1) і (2), мають одну спільну точку.

Для $N = 5$ пар координат нижньої точки шліфувального круга $[X_{o_1}(f), Y_{o_1}(f)], [X_{o_1}(k), Y_{o_1}(k)], [X_{o_1}(l), Y_{o_1}(l)], [X_{o_1}(j), Y_{o_1}(j)], [X_{o_1}(J), Y_{o_1}(J)]$, як і при побудові полінома оригінальної, наближають поліномом Чебишева $(n - 1)$ -го степеня. Одержують траєкторію переміщення нижньої точки траєкторії шліфувального круга для виготовлення деталі криволінійного перерізу, заданої поліномом (1):

$$Y_{o_1} = c_0 + c_1 X_{o_1} + c_2 X_{o_1}^2 + c_3 X_{o_1}^3 + c_4 X_{o_1}^4. \quad (3)$$

На кожному j -му кроці переміщення нижньої точки шліфувального круга за координатою $X_{o_1}(j) = mj$ ($j = 1, 2, 3, \dots, J$) і поліномом (3) розраховується координата $Y_{o_1}(j)$ нижньої точки.

Для установки шліфувального круга в початкову точку траєкторії переміщення нижню точку шліфувального круга суміщають із віссю обертання вала шпиндельної опори. З початкового положення шліфувальний круг переміщають по координаті X із заданим кроком

мікропереміщення. На кожному j -му кроці мікропереміщення шліфувального круга по координаті X координаті Y шліфувального круга задають приріст $\Delta Y_{o_1}(j) = Y_{o_1}(j) - Y_{o_1}(j - 1)$. Нижня точка шліфувального круга буде переміщатися по траєкторії, заданій поліномом (3).

Вимірюється похибка обробки деталі, що виготовляється. Якщо ця похибка перевищує допустиму, коректується траєкторія переміщення шліфувального круга. Для цього:

- підвищується степінь полінома (2), шляхом збільшення кількості точок, за якими будується поліном;

- підвищується степінь полінома (3), що наближає траєкторію переміщення шліфувального круга, шляхом збільшення числа пар координат нижньої точки шліфувального круга, за якими будується цей поліном.

Шліфування виконується за уточненою траєкторією переміщення шліфувального круга.

2. Алгоритм побудови траєкторії переміщення шліфувального круга з дугоподібною шліфувальною поверхнею для обробки тіл обертання, симетричних відносно осі обертання.

Цей алгоритм передбачає таку послідовність дій [3]:

1. Будується ортогональний поліном Чебишева, що наближає оригінальну дугоподібну шліфувальну поверхню. Для цього в системі координат $X_2O_2Y_2$ вимірюються координати n точок, що належать оригінальній (див. рис. 2). При цьому щуп координатно-вимірювальної машини переміщається по осі X у площині, що проходить через вісь симетрії шліфувального круга. З дискретністю ΔX_2 вимірюють координати точок $Y_{2oz}(n)$, що належать оригінальній (табл. 1).

Для підвищення точності вимірів, що складають цю таблицю, ордината кожної точки вимірюється k разів. Якщо відомо, що випадкові помилки розподілені за законом Гауса, то найбільш імовірними значеннями

N_{3M}	1	2	3	...	n	$n+1$
$X_{2oz.}$	ΔX_2	$2\Delta X_2$	$3\Delta X_2$	...	$n\Delta X_2$	$(n+1)\Delta X_2$
$Y_{2oz.}$	$Y_{2oz.}(1)$	$Y_{2oz.}(2)$	$Y_{2oz.}(3)$	...	$Y_{2oz.}(n)$	$Y_{2oz.}(n+1)$

$N_{изм}$	1	2	3	...	n	$N+1$
$X_{ог.}$	$\Delta \bar{X}_2$	$2\Delta \bar{X}_2$	$3\Delta \bar{X}_2$	...	$n\Delta \bar{X}_2$	$(n+1)\Delta \bar{X}_2$
$\bar{Y}_{2oz.}$	$\bar{Y}_{2oz.}(1)$	$\bar{Y}_{2oz.}(2)$	$\bar{Y}_{2oz.}(3)$	...	$\bar{Y}_{2oz.}(n)$	$\bar{Y}_{2oz.}(n+1)$

ординат $Y_{2oz.}(1), Y_{2oz.}(2), Y_{2oz.}(3), \dots, Y_{2oz.}(n+1)$ точок огинальної є середні арифметичні спостережуваних вимірів. Усереднені ординати таких точок наведено в табл. 2.

За вимірами цієї таблиці будується ортогональний поліном Чебишева, що наближає огинальну дугоподібної шліфувальної поверхні шліфувального круга (у системі координат $X_2O_2Y_2$)

$$\bar{Y}_{2oz.} = b_0 + b_1 X_{2oz.} + b_2 X_{2oz.}^2 + \dots + b_n X_{2oz.}^n \quad (4)$$

Поліном (4) подають у системі координат $X_1O_1Y_1$, осі якої паралельні осям системи координат $X_2O_2Y_2$, а її початок суміщений з нижньою точкою огинальної. Для цього похідна $d\bar{Y}_{2oz.}/dX_{2oz.}$ від полінома (4) прирівнюється до нуля:

$$d\bar{Y}_{2oz.}/dX_{2oz.} = b_1 + 2b_2 X_{2oz.} + 3b_3 X_{2oz.}^2 + \dots + nb_n X_{2oz.}^{(n-1)} = 0 \quad (5)$$

Рішення (5) дає координату $X_{2н.м.ог.}$ нижньої точки огинальної. Підставивши отримане значення $X_{н.м.ог.}$ у (4), одержуємо координату $\bar{Y}_{2н.м.ог.}$. У системі координат $X_1O_1Y_1$ поліном (4) набирає вигляду:

$$Y_{1oz.} = (b_0 + \bar{Y}_{2н.м.ог.}) + b_1 (X_{2н.м.ог.} + X_{1oz.}) + b_2 \times (X_{2н.м.ог.} + X_{1oz.})^2 + \dots + b_n (X_{2н.м.ог.} + X_{1oz.})^n \quad (6)$$

Позначивши $b_0 + \bar{Y}_{2н.м.ог.} = b'_0$, поліном (6) надамо у вигляді:

$$Y_{1oz.} = b'_0 + b_1 (X_{2н.м.ог.} + X_{1oz.}) + b_2 \times (X_{2н.м.ог.} + X_{1oz.})^2 + \dots + b_n (X_{2н.м.ог.} + X_{1oz.})^n \quad (7)$$

2. Якщо припустити, що вісь симетрії деталі криволінійного перерізу, огинальна якого задана поліномом (1), суміщена з віссю обертання вала шпindelної опори (див. рис. 1), то тоді нижня точка дугоподібної шліфувальної поверхні в початковій точці траєкторії переміщення шліфувального круга лежить на осі обертання вала шпindelної опори. Огинальна ж дугоподібної шліфувальної поверхні лежить у площині системи координат XOY , вісь Y якої суміщена з віссю обертання вала шпindelної опори, а вісь X лежить у площині основи деталі. Для J точок $X(1), X(2), \dots, X(j), \dots, X(J)$, що лежать на відрізку півосі OX , рівному максимальному радіусу деталі, розраховуються ординати J точок огинальної деталі криволінійного перерізу

$$Y(j) = a_0 + a_1 X(j) + a_2 X^2(j) + \dots + a_n X^n(j), \quad (j = 1, 2, 3, \dots, J).$$

Зберігаючи осі систем координат XOY і $X_1O_1Y_1$ паралельними, нижній точці огинальної дугоподібної шліфувальної поверхні

послідовно задають координати $[X(1), Y(1)]$, $[X(2), Y(2)]$, ..., $[X(j), Y(j)]$, ..., $[X(J), Y(J)]$ і, варіюючи за методом простих ітерацій ординати $Y(j) = Y_{o_1}(j)$ нижньої точки огинальної ($j = 1, 2, 3, \dots, J$), визначають значення ординат $Y_{o_1}(j)$ ($j = 1, 2, 3, \dots, J$) нижньої точки огинальної, при яких огинальна шліфувальної поверхні і огинальна деталі, задана поліномом (1), мають одну спільну точку.

Розглянемо п. 2 для точки огинальної деталі з координатами $X(j), Y(j)$ (див. рис.1, $j = 3$).

Нижній точці O_1 шліфувального круга задають координати $X_{o_1}(j) = X(j), Y_{o_1}(j) = Y(j)$. Координати $Y_{o_1}(j)$ точки O_1 задають приріст ΔY і подають ординату цієї огинальної в системі координат XOY

$$Y_{oz.} = [b'_0 + Y_{o_1}(j) + \Delta Y] + b_1[X_{2н.т.оз.} + X_{1оз.}] + b_2[X_{2н.т.оз.} + X_{1оз.}]^2 + \dots + b_n[X_{2н.т.оз.} + X_{1оз.}]^n \quad (8)$$

Задається крок ΔX варіації змінної X полінома (1) і змінної $X_{1оз.}$ полінома (8). Значення змінної X полінома (1) у системі координат XOY змінюється з кроком ΔX від $X_{o_1}(j)$ до $(X_{o_1}(j) - X_D)$, а значення змінної $X_{1оз.}$ полінома (8) від значення $X_{1оз.} = -\Delta X$ до значення $X_{1оз.} = -X_{1Д}$ ($X_{1Д}$ – координата точки D (див. рис. 1) у системі координат $X_1O_1Y_1$). Для кожного значення цих змінних у системі координат XOY обчислюються ординати точок, що належать огинальній деталі і огинальній дугоподібної шліфувальної поверхні:

$$Y(k) = a_0 + a_1[X_{o_1}(j) - k\Delta X] + a_2 \times [X_{o_1}(j) - k\Delta X]^2 + \dots + a_n[X_{o_1}(j) - k\Delta X]^n; \quad (9)$$

$$Y_{oz.}(k) = [b'_0 + Y_{o_1}(j) + \Delta Y] + b_1[X_{2н.т.оз.} - k\Delta X] + b_2[X_{2н.т.оз.} - k\Delta X]^2 + \dots + b_n[X_{2н.т.оз.} - k\Delta X]^n \quad (10)$$

На кожному k -му кроці варіацій значень змінних X і $X_{1оз.}$ обчислюється різниця P_k між

ординатою точки, що належить огинальній дугоподібної шліфувальної поверхні, і ординатою точки огинальної деталі

$$P_k = Y_{oz.}(k) - Y(k), \quad (11)$$

і перевіряється виконання нерівності

$$P_k > 0. \quad (12)$$

Якщо на k -му кроці варіації значень змінних X і $X_{1оз.}$ нерівність $P_k > 0$ не виконується, огинальні деталі й шліфувальної поверхні перетинаються. Нижній точці огинальної шліфувальної поверхні задається черговий приріст ΔY у відповідності до (10):

$$Y_{o_1}(n) = Y_{o_1}(j) + n\Delta Y \quad (13)$$

Варіюються значення змінних X і $X_{1оз.}$ з кроком ΔX . На кожному кроці варіації цих змінних обчислюються ординати точок, що належать огинальній деталі і огинальній шліфувальної поверхні. Обчислюється різниця P_k і перевіряється виконання нерівності $P_k > 0$. Якщо на всьому інтервалі зміни змінних X і $X_{1оз.}$ нерівність (12) не виконується, наведені вище дії повторюються до виконання цієї нерівності на всьому цьому інтервалі.

Якщо на всьому інтервалі зміни змінних X і $X_{1оз.}$ нерівність $P_k > 0$ виконується, огинальна дугоподібної шліфувальної поверхні перебуває над огинальною деталі. Тоді зменшують ординату $Y_{o_1}^{(1)}(j) = Y_{o_1}(j) + n\Delta Y$ на половину дискрети ΔY , тобто

$$Y_{o_1}^{(1)}(j) = Y_{o_1}(j) + n\Delta Y - \Delta Y / 2 \quad (14)$$

і зменшують крок ΔX зміни змінних X і $X_{1оз.}$ в r разів ($r = 2, 3, 4, \dots$), $\Delta X_1 = \Delta X / r$.

Задається величина допустимого відхилення ε ординати точки, що належить огинальній шліфувальної поверхні, від ординати огинальної деталі.

2.1. У тому ж інтервалі змінюються значення змінних X і $X_{1oz.}$ з кроком ΔX_1 :

$$\begin{aligned} X(k) &= X_{O_1}(j) - k\Delta X_1, \quad X_{1oz.}(k) = \\ &= X_{2н.м.оз.} - k\Delta X_1, \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (15)$$

Для кожного значення змінних X і $X_{1oz.}$ обчислюються ординати точок, що належать оригінальній деталі й оригінальній шліфувальній поверхні, заданих поліномами (9) і (10):

$$\begin{aligned} Y(k) &= a_0 + a_1[X_{O_1}(j) - k\Delta X_1] + \\ &+ a_2[X_{O_1}(j) - k\Delta X_1]^2 + \dots \\ &\dots + a_n[X_{O_1}(j) - k\Delta X_1]^n; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} Y_{oz.}(k) &= [b_0' + Y_{O_1}(j) + n\Delta Y - \\ &- \Delta Y / 2] + b_1[X_{2н.м.оз.} - k\Delta X_1] + \\ &+ b_2[X_{2н.м.оз.} - k\Delta X_1]^2 + \dots \\ &\dots + b_n[X_{2н.м.оз.} - k\Delta X_1]^n. \end{aligned} \quad (17)$$

Обчислюють величину різниці P_k між цими ординатами відповідно до (11). Визначають і запам'ятовують мінімальну різницю $P_{k \min}$ на інтервалі зміни змінних X і $X_{1oz.}$ і номер дискретності k зміни цих змінних, на якій отримано мінімальну різницю $P_{k \min}$. Перевіряють виконання нерівності

$$P_{k \min} < \varepsilon, \quad (18)$$

і якщо ця нерівність виконується, запам'ятовують координати нижньої точки дугоподібної шліфувальної поверхні (у системі координат XOY)

$$X_{O_1}(j), \quad Y_{O_1(n)}^{(1)}(j) = Y_{O_1}(j) + n\Delta Y - \Delta Y / 2, \quad (19)$$

при яких відхилення формотворної точки оригінальної шліфувальної поверхні від оригінальної деталі по координаті Y не перевищує допустимого значення ε .

2.2. У разі, коли нерівність $P_{k \min} < \varepsilon$ не виконується, перевіряють, чи приймала різниця P_k значення $P_k < 0$, і якщо приймала, то оригінальні

деталі і шліфувальної поверхні перетнулися. Збільшується ордината нижньої точки шліфувальної поверхні на половину дискретності зміни цієї ординати на попередньому кроці

$$Y_{O_1}^{(2)}(n) = Y_{O_1}(j) + n\Delta Y - \Delta Y / 2 + \Delta Y / 4. \quad (20)$$

Якщо ж не приймала, то $P_k > 0$ на всьому інтервалі зміни змінних X і $X_{1oz.}$. Оригінальна шліфувальної поверхні залишилася над оригінальною деталі і відстань $P_{k \min}$ по координаті Y перевищує допустиму величину відхилення ε . Зменшують ординату нижньої точки шліфувальної поверхні $Y_{O_1(n)}^{(1)}(j) = Y_{O_1}(j) + n\Delta Y - \Delta Y / 2$ на половину дискретності зміни цієї ординати на попередньому кроці

$$Y_{O_1}^{(2)}(n) = Y_{O_1}(j) + n\Delta Y - \Delta Y / 2 - \Delta Y / 4. \quad (21)$$

У цьому ж інтервалі для ординати нижньої точки оригінальної шліфувальної поверхні, заданої (20) і (21), змінюють значення змінних X і $X_{1oz.}$ з кроком ΔX_1 у відповідності до (15). На кожному кроці зміни цих змінних обчислюються координати точок оригінальної деталі і оригінальної шліфувальної поверхні. Обчислюється й запам'ятовується різниця ординат P_k . Визначається мінімальне значення цієї різниці $P_{k \min}$ на всьому інтервалі зміни змінних і запам'ятовується номер дискретності k , на якій досягнута мінімальна різниця. Перевіряється виконання нерівності $P_{k \min} < \varepsilon$.

У разі, коли нерівність $P_{k \min} < \varepsilon$ виконується, запам'ятовуються координати нижньої точки шліфувальної поверхні $X_{O_1}(j), Y_{O_1}^{(2)}(n) = Y_{O_1}(j) + n\Delta Y - \Delta Y / 2 \pm \Delta Y / 4$, при яких відхилення формотворної точки оригінальної дугоподібної шліфувальної поверхні від оригінальної деталі по координаті Y не перевищує допустимого значення ε .

Якщо ж ця нерівність не виконується, збільшують ординату нижньої точки оригінальної шліфувальної поверхні на половину дискретності зміни цієї ординати на попередньому кроці, за умови, що на інтервалі зміни

змінних X і $X_{1_{оз}}$. різниця P_k приймала від'ємні значення. Якщо на цьому інтервалі різниця P_k не приймала від'ємних значень, зменшують ординату нижньої точки огинальної шліфувальної поверхні на ту саму величину.

Виконуючи наведені вище дії на кроці d дробіння дискретності ΔY досягають виконання нерівності $P_{k \min} < \varepsilon$ й одержують координати нижньої точки шліфувальної поверхні

$$X_{o_1}(j), Y_{o_1}^{(d)}(n) = Y_{o_1}(j) + n\Delta Y - \Delta Y/2 \pm \Delta Y/4 \pm \dots \pm \Delta Y/f,$$

при яких відхилення по координаті Y формотворної точки від огинальної деталі не перевищує допустимого значення ε .

2.3. Наведені вище дії алгоритму виконуються для J точок $X(1), X(2), \dots, X(j), \dots, X(J)$, що лежать на відрізку півосі OX системи координат XOY , рівному радіусу основи деталі. У результаті одержують J пар координат нижньої точки огинальної дугоподібної шліфувальної поверхні, що належать траєкторії переміщення цієї нижньої точки огинальної, при якій у кожний відтинок часу огинальна деталі, задана поліномом (1), і огинальна дугоподібної шліфувальної поверхні, задана поліномом (7), мають одну спільну точку:

$$\begin{aligned} X_{o_1}(1), Y_{o_1}^{(d)}(n) &= Y_{o_1}(1) + n\Delta Y - \Delta Y/2 \pm \Delta Y/4 \pm \dots \pm \Delta Y/f; \\ X_{o_1}(2), Y_{o_1}^{(d)}(n) &= Y_{o_1}(2) + n\Delta Y - \Delta Y/2 \pm \Delta Y/4 \pm \dots \pm \Delta Y/f; \dots; \\ X_{o_1}(j), Y_{o_1}^{(d)}(n) &= Y_{o_1}(j) + n\Delta Y - \Delta Y/2 \pm \Delta Y/4 \pm \dots \pm \Delta Y/f; \dots; \\ X_{o_1}(J), Y_{o_1}^{(d)}(n) &= Y_{o_1}(J) + n\Delta Y - \Delta Y/2 \pm \Delta Y/4 \pm \dots \pm \Delta Y/f, \end{aligned} \quad (22)$$

де $f = 8, 16, 32, \dots, J$ точок, що належать траєкторії переміщення нижньої точки огинальної шліфувальної поверхні, і початкова точка траєкторії переміщення цієї точки на-

ближаються ортогональним поліномом Чебишева. Отримують траєкторію переміщення нижньої точки шліфувальної поверхні, при якій формотворна точка переміщається по дугоподібній шліфувальній поверхні і в кожний відтинок часу не відхиляється по координаті Y від огинальної деталі більше допустимої величини відхилення ε :

$$Y_{o_1} = c_0 + c_1 X_{o_1} + c_2 X_{o_1}^2 + \dots + c_{n_1} X_{o_1}^{n_1}. \quad (23)$$

2.4. У процесі шліфування нижня точка дугоподібної шліфувальної поверхні (нижня точка шліфувального круга) переміщається з початкової точки траєкторії її переміщення (див. рис. 1) з координатами $X_{o_1}(0) = 0, Y_{o_1}(0) = a_0$ по траєкторії, заданій поліномом (23). Для цього нижня точка шліфувального круга дискретно з установленим кроком m мікропереміщення переміщається по осі X з початкової точки траєкторії переміщення на відстань OL , більше радіуса деталі на величину проекції DX_1 крайньої точки D шліфувальної поверхні на вісь X_1 системи координат $X_1O_1Y_1$. На кожному i -му кроці мікропереміщення шліфувального круга ($i = 1, 2, 3, \dots, I = OL/m$) по осі X системи координат XOY ординаті Y_{o_1} шліфувального круга задається приріст $\Delta Y_{o_1}(i)$, який дорівнює приросту ординати траєкторії переміщення шліфувального круга на i -му кроці мікропереміщення

$$\begin{aligned} \Delta Y_{o_1}(i) &= Y_{o_1}(i) - Y_{o_1}(i-1) = \\ &= [c_0 + c_1 X_{o_1}(i) + c_2 X_{o_1}^2(i) + \dots + c_{n_1} X_{o_1}^{n_1}(i)] - \\ &= [c_0 + c_1 X_{o_1}(i-1) + c_2 X_{o_1}^2(i-1) + \dots \\ &\dots + c_{n_1} X_{o_1}^{n_1}(i-1)] \end{aligned} \quad (24)$$

Одержують деталь криволінійного перерізу, симетричну відносно осі обертання, огинальна якої задана поліномом (1).

3. Вимірюється похибка виготовлення деталі. Якщо вона перевищує допустиму, коректується траєкторія переміщення шліфувального

круга. Для цього підвищують степінь полінома (7), що наближає огинальну шліфувальної поверхні. Для підвищення степеня полінома збільшують кількість вимірюваних точок на огинальній шліфувальної поверхні. Будують наближальний поліном виду (7) степеня $n_2 > n_1$

$$Y_{O_1} = d_0 + d_1(X_{2н.м.ог.} - X_{1ог.}) + d_2(X_{2н.м.ог.} - X_{1ог.})^2 + \dots + d_{n_2}(X_{2н.м.ог.} - X_{1ог.})^{n_2}. \quad (25)$$

Визначають $J_1 > J$ пар координат нижньої точки огинальної шліфувальної поверхні, при яких огинальні деталі і шліфувальної поверхні мають одну спільну точку. За числом J_1 пар координат будують поліном виду (23) степеня $n_2 > n_1$

$$Y_{O_1} = c_0^{(1)} + c_1^{(1)}X_{O_1} + c_2^{(1)}X_{O_1}^2 + \dots + c_{n_2}^{(1)}X_{O_1}^{n_2} \quad (26)$$

і виконують шліфування за уточненою траєкторією, забезпечуючи при цьому точність, як показали теоретичні розрахунки, близько 0,03 мкм.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тарасов В.А., Зиненко В.Н., Бурляй Ю.И. Технология устойчивости системы стабилизации оси вращения вала суперпрецизионной шпиндельной опоры / В.А. Тарасов, В.Н. Зиненко, Ю.И. Бурляй // Всесоюзный научно-технический журнал АВП. – № 2(19). – 2004. – С.167–172.
2. Пат. 70106 Україна. Прецизионная шпиндельная опора / Тарасов В.А., Зиненко В.Н. – 2004.
3. Пат. 20646 А Україна. Аэростатическая осевая опора / Зиненко В.Н., Шепелев А.А. – 1997.
4. Пат. 98995 Україна. Пристрій стабілізації радіального положення осі обертання радіальної аеростатичної опоры / Тарасов В.О., Левін І.О. – 2012.
5. Пат. 69126 А Україна. Способ стабилизации радиального положения оси вращения вала аэростатической шпиндельной опоры / Тарасов В.А., Зиненко В.Н. – 2004.
6. Якимов А.Н. Паршаков В.И. Управление процессом шлифования. – К.: Техника, 1988.

УкрІНТЕІ надає послуги:

видавничо-поліграфічні

521-09-37, 521-09-06

тиражування матеріалів

повнокольоровий друк

комп'ютерний набір і верстка

додрукарська підготовка й післядрукарська обробка

наукове й літературне редагування науково-економічних і

інформаційних матеріалів

виготовлення брошур, журналів, каталогів, буклетів, бланків

переплітання дисертацій, звітів, ламінування

з організації виставкової діяльності

521-00-18

організація і проведення тематичних

виставок і виставок-ярмарків