



УДК 621:658.011.56

## ТЕХНОЛОГІЯ Й АВТОМАТИЗАЦІЯ СПОСОБУ ВИМІРУ КООРДИНАТ ОСІ ОБЕРТАННЯ ВАЛА АЕРОСТАТИЧНОЇ ШПИНДЕЛЬНОЇ ОПОРИ



В. О. Тарасов, *докт. техн. наук*,  
І. О. Левін

**Аналіз стану проблеми.** Точність верстатів обумовлює технічний прогрес, оскільки дає змогу реалізувати широкий спектр сучасних наукомістких технологій, а саме: металооптичні дзеркала для ультрафіолетового випромінювання; дифракційні ґрати лазерних систем; паливні насоси дизельних двигунів, які необхідно виготовляти з нормальною похибкою положення точки різання, що не перевищує 0,03 мкм.

**Постановка проблеми.** Для досягнення такої точності елементи формоутворення верстата мають

оснащуватися високоточними пристроями стабілізації їхнього положення й позиціонування. Так, шпиндельна опора суперпрецизійного верстата має бути оснащена пристроєм стабілізації радіального положення осі обертання вала опори. Передусє побудові такого пристрою розробка технології способу вимірювання координат осі обертання вала шпиндельної опори.

Технологія і спосіб вимірювання координат осі обертання вала опори розглядається стосовно аеростатичної шпиндельної опори верстата (рис. 1),

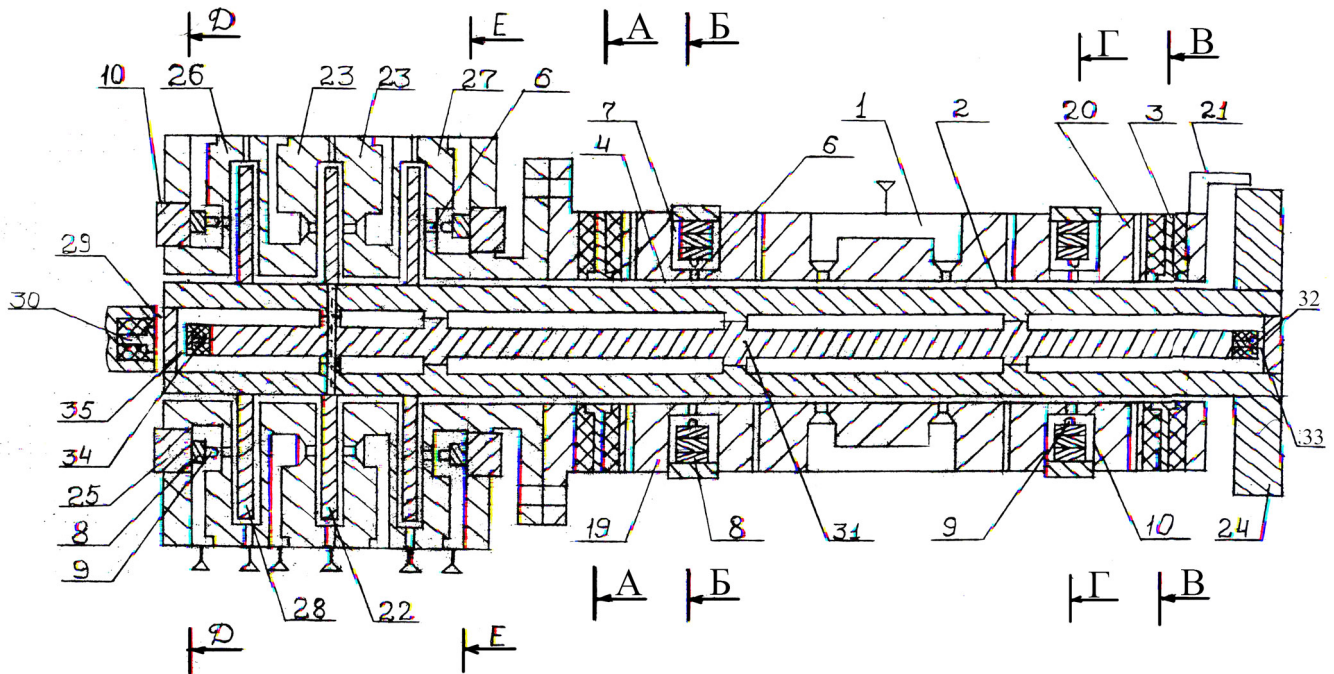


Рис. 1. Аеростатична шпиндельна опора верстата

до складу якої входять такі елементи: радіальна аеростатична шпindelьна опора 1 з двома лініями наддуву [1], радіальне положення осі обертання вала 2 якої стабілізується відносно положення, обраного як незміщене. Датчики 3 величин зазорів забезпечують вимірювання зазорів 4 між основами цих датчиків і поверхнею вала опори. Датчики встановлені в перетинах по А – А і В – В корпусу 5 опори, симетричних відносно радіальної аеростатичної опори. У кожному перетині (рис. 2) по осях систем координат  $X^A O^A Y^A$ ,  $X_1^B O_1^B Y_1^B$ ,  $X^B O^B Y^B$  і  $X_1^B O_1^B Y_1^B$  у розглянутому прикладі побудови опори встановлено по вісім датчиків величин зазорів. Вектори сил компенсації радіального навантаження формуються в базових системах координат  $X^A O^A Y^A$  і  $X^B O^B Y^B$ .

У кожному перетині по Б – Б і Г – Г опори виконані регулятори тиску газу, об'єднані в чотири групи:

Перетин по:	Група регуляторів тиску
Б – Б	11, 12, 13, 14
Г – Г	15, 16, 17, 18.

Кожна група регуляторів тиску виконана симетрично відносно осей систем координат  $X^B O^B Y^B$  і  $X^G O^G Y^G$ , осі яких паралельні осям базових систем координат  $X^A O^A Y^A$  і  $X^B O^B Y^B$ .

Датчики величин зазорів, встановлені в перетині по А – А й групи регуляторів тиску в перетині по Б – Б опори утворюють компенсатор 19 радіального зсуву осі обертання вала опори. Компенсатор 20 радіального зсуву утворюють датчики величин зазорів, встановлені в перетині по В – В опори і групи регуляторів тиску в перетині по Г – Г цієї опори.

Аеростатична шпindelьна опора оснащена вимірювачем 21 кута повороту вала.

Датчики величин зазорів через блок стабілізації радіального положення осі обертання вала з'єднані з відповідними групами регуляторів тиску компенсаторів радіального зсуву осі обертання.

Силове замикання вала опори в осьовому напрямку виконує двосторонній аеростатичний підп'ятник, що включає в себе п'яту 22 і підп'ятники 23. Стабілізація осьового положення площини планшайби 24 здійснюється за допомогою компенсаторів 26 і 27 осьового зсуву площини планшайби.

### Принцип вимірювання координат осі обертання вала аеростатичної шпindelьної опори

Припустимо, що координати датчиків  $C_1 - C_8$ , встановлених у перетинах по А – А й В – В опори по осях систем координат  $X O Y$  і  $X_1 O_1 Y_1$  відомі, кожен перетин вала по А – А і В – В – коло радіуса  $R$ , а вісь обертання вала проходить через центри окружностей у цих перетинах. У разі таких допущень за допомогою двох датчиків, наприклад  $C_1$  і  $C_3$ , встановлених по різних осях системи координат  $X O Y$ , можуть бути

визначені координати осі обертання вала опори.

Нехай вал (рис. 2) під впливом радіального навантаження змістився в газовому шарові радіальної аеростатичної опори. У результаті цього його вісь обертання перемістилася з точки "0" в точку  $l$ , а величини зазорів під датчиками  $C_1$  і  $C_3$  стали рівними  $Z_1$  і  $Z_3$  відповідно. Тоді координати  $X_l$  і  $Y_l$  зміщеної осі обертання вала визначаються з системи рівнянь:

$$\begin{cases} (C_1 l)^2 = (x_{C_1} - x_l)^2 + (y_{C_1} - y_l)^2, \\ (C_3 l)^2 = (x_{C_3} - x_l)^2 + (y_{C_3} - y_l)^2, \end{cases} \quad (1)$$

де  $x_{C_1} = 0$ ;

$y_{C_1}, x_{C_3}, y_{C_3} = 0$  – координати центрів основ датчиків  $C_1$  і  $C_3$  в системі координат  $X O Y$ ;

$C_1 l = R + Z_1, C_3 l = R + Z_3$  – відстані між центрами основ датчиків  $C_1$  і  $C_3$  і зміщеною віссю обертання вала.

З урахуванням уведених позначень система (1) набуває вигляду:

$$\begin{cases} (R + Z_1)^2 = x_l^2 + y_{C_1}^2 - 2 \cdot y_{C_1} \cdot y_l + y_l^2, \\ (R + Z_3)^2 = x_l^2 + x_{C_3}^2 - 2 \cdot x_{C_3} \cdot x_l + y_l^2. \end{cases} \quad (2)$$

Застосувавши метод вирахування, маємо:

$$x_l = \frac{(R + Z_1)^2 - (R + Z_3)^2}{2 \cdot x_{C_3}} + \frac{y_{C_1}}{x_{C_3}} \cdot y_l$$

або

$$x_l = k + m \cdot y_l.$$

$x_l$  підставимо в перше рівняння системи (2):

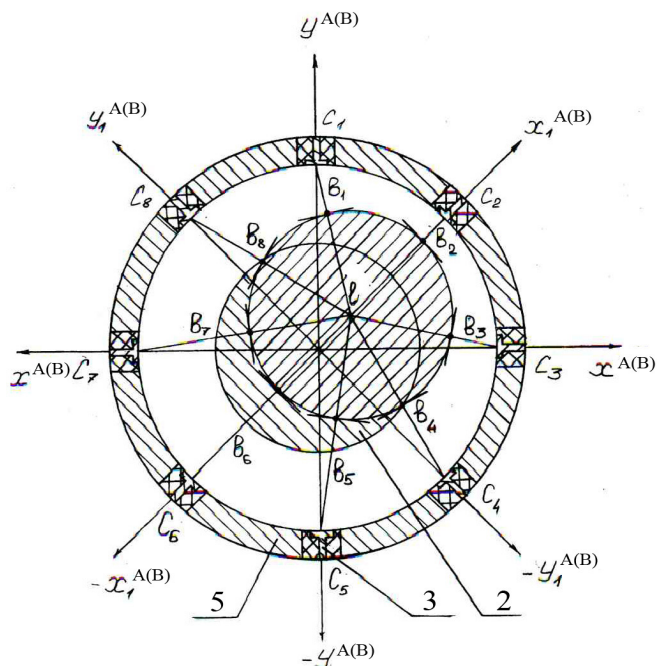


Рис. 2. Вал

$$(R + Z_1)^2 = (k + m \cdot y_l)^2 + y_{C_1}^2 - 2 \cdot y_{C_1} \cdot y_l + y_l^2.$$

Після перетворення рівняння для обчислення координати осі обертання вала набирає вигляду:

$$(m^2 + 1) \cdot y_l^2 + [2 \cdot k \cdot m - 2 \cdot y_{C_1}] \cdot y_l + [k^2 + y_{C_1}^2 - (R + Z_1)^2] = 0.$$

Один із коренів  $y_l^{(1)}$  або  $y_l^{(2)}$  останнього рівняння є координатою  $Y_l$  зміщеної осі обертання вала. Підставивши корені  $y_l^{(1)}$  і  $y_l^{(2)}$  у вираз для  $x_l$ , одержимо корені  $x_l^{(1)}$  і  $x_l^{(2)}$ , один з яких також є координатою  $Y_l$  зміщеної осі обертання вала. Алгоритм відбору координат осі обертання вала з множини розв'язків систем рівнянь виду (1) буде наведено нижче.

Система рівнянь (1) відповідає припущенню, що вал виготовлений без похибок, тобто кожний перетин вала опори площинами установки датчиків коло радіуса  $R$ . Реально похибка виготовлення вала становить 5–10 мкм, впливом якої на точність вимірювання координат осі обертання не можна нехтувати тому що:

- некругість вала більш ніж на два порядки перевищує величину припустимого зсуву осі обертання вала суперпрецизійної аеростатичної шпindelної опори і спричиняє зміну величин зазорів під датчиками при обертанні вала без зсуву осі обертання. Оскільки координати осі обертання визначаються по вимірюваннях величин зазорів, некругість вала сприймається як зсув осі обертання;

- унаслідок некругості вала знижується точність визначення координат датчиків величин зазорів.

Для визначення координат осі обертання вала опори з системи рівнянь (1) з високою точністю необхідно:

- перетин вала площинами установки датчиків величин зазорів задати найближчим еліпсом. Координати центрів еліпсів, що наближають перетин вала, приймаються як координати осі обертання вала опори;

- по параметрах еліпсів, що наближають, з високою точністю визначити координати датчиків величин зазорів у системах координат  $XOY$  і  $X_1O_1Y_1$ ;

- корегувати вимірювання величин зазорів на величину відхилення полярного радіуса еліпса, що наближає, від кола радіуса  $R$ , рівного величині малої півосі "b" еліпса, що наближає, центр якої сполучений із центром еліпса, що наближає перетин.

За вимірюваннями  $N$  датчиків, установлених по осях  $S$  систем координат  $N = 4S$ , може бути складено  $C_N^2 - 2S$  систем рівнянь виду (1). Для  $S = 2$  маємо:

$$\begin{cases} (C_i l)^2 = (x_{C_i} - x_l)^2 + (y_{C_i} - y_l)^2, \\ (C_k l)^2 = (x_{C_k} - x_l)^2 + (y_{C_k} - y_l)^2 \end{cases} \quad (3)$$

при непарних  $i, k$

$$\begin{cases} (C_i l)^2 = (x_{(1)C_i} - x_{(1)l})^2 + (y_{(1)C_i} - y_{(1)l})^2, \\ (C_k l)^2 = (x_{(1)C_k} - x_{(1)l})^2 + (y_{(1)C_k} - y_{(1)l})^2 \end{cases} \quad (4)$$

при парних  $i, k$

$$\begin{cases} (C_i l)^2 = (x_{C_i} - x_l)^2 + (y_{C_i} - y_l)^2, \\ (C_k l)^2 = (x_{(1)C_k} - x_{(1)l})^2 + (y_{(1)C_k} - y_{(1)l})^2 \end{cases} \quad (5)$$

при непарних  $i$  і парних  $k$

$$\begin{cases} (C_i l)^2 = (x_{(1)C_i} - x_{(1)l})^2 + (y_{(1)C_i} - y_{(1)l})^2, \\ (C_k l)^2 = (x_{C_k} - x_l)^2 + (y_{C_k} - y_l)^2 \end{cases} \quad (6)$$

при парних  $i$  і непарних  $k$ , де  $i = \overline{1,8}$ ,  $k = \overline{1,8}$ , причому  $i \neq k$ ,  $i \neq k \pm 4$ .

Надлишок інформації про положення осі обертання дає змогу, застосовуючи метод найменших квадратів, отримати оцінки координат осі обертання вала аеростатичної шпindelної опори.

**Визначення параметрів еліпсів, що наближають, і координат датчиків величин зазорів. Корекція величин вимірюваних зазорів на величину некругості вала**

Параметри еліпса, що наближає перетин вала аеростатичної шпindelної опори площиною установки датчиків величин зазорів, визначимо за вимірюваннями датчиків  $C_1 - C_8$ , встановлених по осях систем координат  $XOY$  і  $X_1O_1Y_1$  зі сполученими початками і осями, поверненими відносно один одного на кут  $45^\circ$ . Параметри цього еліпса визначаються в такій послідовності: перетин вала аеростатичної шпindelної опори площиною установки датчиків установлюється симетрично відносно осей базової системи координат  $XOY$ . Центр перетину вала сполучається з початком системи координат  $XOY$ . Виявляється наявність некругості в перетині вала опори. Для цього вал опори встановлюється на довільний кут повороту. Подачу сигналів керування на групи регуляторів тиску, розташованих по осі  $Y$  системи координат  $XOY$ , під датчиками  $C_1$  і  $C_5$  встановлюють рівні величини



згорів  $Z_1(0) = Z_5(0)$ . Вимірюють і запам'ятовують величини зазорів  $Z_3(0)$  і  $Z_7(0)$  під датчиками  $C_3$  і  $C_7$ .

З дискретністю  $\Delta\varphi$  вал установлюється на кути повороту  $\Delta\varphi, 2 \cdot \Delta\varphi, \dots, k \cdot \Delta\varphi, \dots, 360^\circ - \Delta\varphi$ . На кожному куті повороту, зміщаючи вал по осі  $X$ , методом послідовних наближень під датчиком  $C_7$  установлюють величину зазору  $Z_7(k \cdot \Delta\varphi) = Z_7(0)$ , а під датчиками  $C_1$  і  $C_5$  – рівні величини зазорів. Вимірюється й запам'ятовується величина зазору  $Z_3(k \cdot \Delta\varphi)$  під датчиком  $C_3$ .

Після виконання цих установок і вимірювань вал опори встановлюється на кут повороту  $\varphi = k \cdot \Delta\varphi$ , на якому під датчиком спостерігалася мінімальна величина зазору  $Z_3(k \cdot \Delta\varphi) = \min$ . Для уточнення кута повороту, якому відповідає мінімальна величина зазору під датчиком  $C_3$ , наведені вище дії виконуються в межах кута  $\varphi = k \cdot \Delta\varphi \pm \Delta\varphi$  з дискретою  $\Delta\varphi_1 \ll \Delta\varphi$ . з дискретою повороту, якому відповідає точна нижня грань  $Z_3(\varphi) = \inf$  множини величин зазорів під датчиком  $C_3$  при виконанні умов:  $Z_1(\varphi) = Z_5(\varphi)$ ,  $Z_7(\varphi) = Z_7(0)$ .

Після виконання цієї установки більша вісь еліпса, що наближає перетин вала, може не збігатися з віссю  $X$  системи координат  $XOY$ . Для суміщення великої осі еліпса з віссю  $X$ , не змінюючи кутового положення вала, його зміщують по осі  $Y$  базової системи координат із кроком  $\Delta y$  в межах інтервалу  $\pm Z_1(\varphi)/2$  і залишають у тому положенні, при якому сума величин зазорів  $Z_3(\varphi)$  і  $Z_7(\varphi)$  є мінімальною. У результаті більша вісь еліпса, що наближає перетин вала, буде сполучена з віссю  $X$  базової системи координат.

Не змінюючи кута повороту вала, зміщують вал по осі  $X$  у межах половини величини зазору  $\pm Z_7(\varphi)/2$  під датчиком  $C_7$  і вимірюють величини зазорів  $Z_1(\varphi)$  і  $Z_5(\varphi)$  під датчиками  $C_1$  і  $C_5$ . Вал опори залишають у положенні, при якому сума величин зазорів  $Z_1(\varphi)$  і  $Z_5(\varphi)$  під датчиками  $C_1$  і  $C_5$  є мінімальною. У результаті мала вісь еліпса, що наближає, буде суміщена з віссю  $Y$  базової системи координат, а на куті  $\varphi$  повороту вала центр еліпса, що наближає перетин вала, буде сполучений з початком цієї системи координат.

Не змінюючи положення вала, вимірюють і запам'ятовують величини зазорів  $Z_1 - Z_8$  під датчиками величин зазорів  $C_1 - C_8$ .

Точка перетину вала площиною установки датчиків величин зазорів, що збігається з початком базової системи координат  $XOY$  після названих вище установок, приймається як точка осі обертання вала, а положення осі обертання вала, при якому вона проходить через початок системи координат  $XOY$ , приймається як її незміщене положення з координатами  $X(0), Y(0)$ .

Кут  $\varphi$  повороту вала, на якому величина зазору  $Z_3$  під датчиком  $C_3$  досягла точної нижньої грані множини величин зазорів, приймається як нульовий

$\varphi = 0$  кута повороту вала.

Якщо в процесі установки перетину вала величина зазору під датчиком  $C_3$  на кутах повороту вала не змінювалася, тобто  $Z_3(k \cdot \Delta\varphi) = \text{const}$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ), перетин вала площиною установки датчиків уважається круглим.

Розраховуються координати датчиків  $C_1, C_3, C_5, C_7$  і  $C_2, C_4, C_6, C_8$  в системах координат при круглому перетині вала:

$$\begin{aligned} [x_{C_1} = 0, y_{C_1} = R + Z_1], \\ [x_{(1)C_2} = R + Z_2, y_{(1)C_2} = 0], \\ [x_{C_3} = R + Z_3, y_{C_3} = 0], \\ [x_{(1)C_4} = 0, y_{(1)C_4} = -(R + Z_4)], \\ [x_{C_5} = 0, y_{C_5} = -(R + Z_5)], \\ [x_{(1)C_6} = -(R + Z_6), y_{(1)C_6} = 0], \\ [x_{C_7} = -(R + Z_7), y_{C_7} = 0], \\ [x_{(1)C_8} = 0, y_{(1)C_8} = R + Z_8]. \end{aligned} \quad (7)$$

Для розрахунків параметрів еліпса, що наближає круглий перетин вала, на куті  $\varphi = 0$  повороту вала (не змінюючи положення вала після виконаних вище установок) датчики величин зазорів зміщують за висотою зазору і встановлюють із однаковим зазором  $Z$  відносно поверхні вала. Тут під зміщенням слід розуміти, що обчислюються й запам'ятовуються величини відхилень зазорів  $Z_1 - Z_8$  від  $Z$  для корекції вимірюваних надалі величин зазорів під датчиками  $C_1 - C_8$  на величину цього відхилення.

Для вимірювання великої півосі еліпса, що наближає, вал установлюється на кут  $\varphi = 90^\circ$ . Зміщуючи вал опори групами регуляторів тиску, під датчиками  $C_1, C_5$  і  $C_3, C_7$  методом послідовних наближень установлюють рівні величини зазорів:

$$Z_1^{\varphi=90^\circ} = Z_5^{\varphi=90^\circ};$$

$$Z_3^{\varphi=90^\circ} = Z_7^{\varphi=90^\circ}$$

і сполучають більшу піввісь "а" еліпса з віссю  $Y$  базової системи координат, а малу піввісь "b" еліпса – з віссю  $X$  цієї системи координат (рис.3). Прийнявши малу піввісь "b" еліпса рівною радіусу "R" вала опори, величину великої півосі "а" визначають із виразу:

$$a = R + \left( Z_1^{\varphi=90^\circ} - Z_1^{\varphi=0^\circ} \right), \quad (8)$$

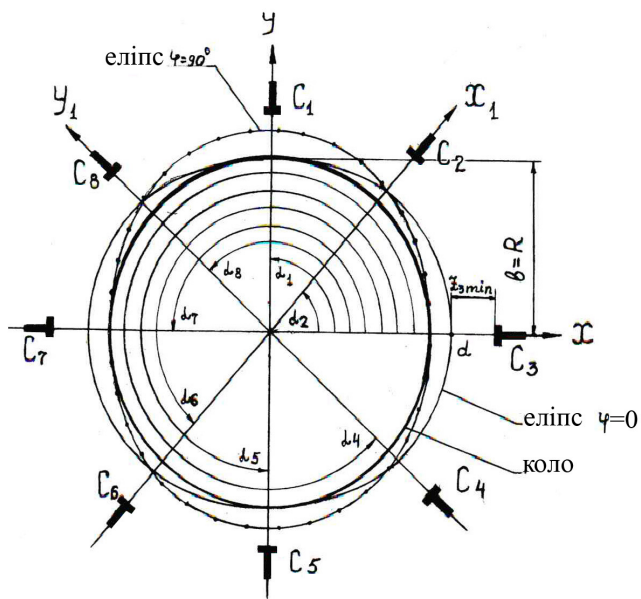


Рис. 3

де  $Z_1^{\varphi=0^\circ}$  – величина зазору під датчиком  $C_1$  на куті  $\varphi = 0^\circ$  повороту вала.

Обчислюється напівфокусна відстань еліпса, що наближає

$$c = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (9)$$

і розраховується його ексцентриситет

$$e = c/a \quad (10)$$

Уточнюється величина малої півосі "b" еліпса, прийнята рівною радіусу  $R$  вала шпиндельної опори. Для уточнення величини малої півосі "b" еліпса вал опори встановлюють на кут  $\varphi = 45^\circ$ . Тоді вершина "d" еліпса переміститься під центр основи датчика  $C_2$ . Зміщують вал по осях  $X_1$  і  $Y_1$  системи координат  $X_1 O_1 Y_1$  і методом послідовних наближень встановлюють рівні величини зазорів під датчиками  $C_2$  і  $C_6$ ,  $C_4$  і  $C_8$ :

$$Z_2^{\varphi=45^\circ} = Z_6^{\varphi=45^\circ}, \quad Z_4^{\varphi=45^\circ} = Z_8^{\varphi=45^\circ}.$$

Оскільки датчики  $C_1 - C_8$  на куті  $\varphi = 0$  повороту вала були встановлені з однаковими зазорами, рівними  $Z$ , центр еліпса після установки рівних величин зазорів під цими датчиками залишиться сполученим з початком системи координат  $X O Y$ . Якщо ж мала піввісь "b" еліпса дорівнює радіусу  $R$  вала, зазори  $Z_1^{\varphi=45^\circ}$ ,  $Z_3^{\varphi=45^\circ}$ ,  $Z_5^{\varphi=45^\circ}$ ,  $Z_7^{\varphi=45^\circ}$  під датчиками  $C_1, C_3, C_5, C_7$  мають прийняти такі розрахункові значення:

$$Z_1^{\varphi=45^\circ} = Z_1 - \left[ \sqrt{\frac{b^2}{1-e^2 \cdot \cos^2(\alpha_1 - 45^\circ)}} - \sqrt{\frac{b^2}{1-e^2 \cdot \cos^2 \alpha_1}} \right];$$

$$Z_3^{\varphi=45^\circ} = Z_3 + \left[ \alpha - \sqrt{\frac{b^2}{1-e^2 \cdot \cos^2(\alpha_3 - 45^\circ)}} \right];$$

$$Z_5^{\varphi=45^\circ} = Z_5 - \left[ \sqrt{\frac{b^2}{1-e^2 \cdot \cos^2(\alpha_5 - 45^\circ)}} - \sqrt{\frac{b^2}{1-e^2 \cdot \cos^2 \alpha_5}} \right]; \quad (11)$$

$$Z_7^{\varphi=45^\circ} = Z_7 + \left[ \alpha - \sqrt{\frac{b^2}{1-e^2 \cdot \cos^2(\alpha_7 - 45^\circ)}} \right].$$

Вимірюються величини зазорів під датчиками  $C_1, C_3, C_5, C_7$  (при тому ж положенні вала) і порівнюються з їхніми розрахунковими значеннями, отриманими в припущенні рівності малої півосі "b" еліпса радіусу  $R$  вала. Якщо рівності

$$Z_{1 \text{ вим.}}^{\varphi=45^\circ} = Z_{1 \text{ розр.}}^{\varphi=45^\circ},$$

$$Z_{3 \text{ вим.}}^{\varphi=45^\circ} = Z_{3 \text{ розр.}}^{\varphi=45^\circ},$$

$$Z_{5 \text{ вим.}}^{\varphi=45^\circ} = Z_{5 \text{ розр.}}^{\varphi=45^\circ},$$

$$Z_{7 \text{ вим.}}^{\varphi=45^\circ} = Z_{7 \text{ розр.}}^{\varphi=45^\circ}.$$

не виконуються, припущення про рівність малої півосі "b" еліпса радіусу  $R$  вала хибне. Для визначення малої півосі "b" еліпса варіюється значення радіуса  $R$  вала в діапазоні  $R \pm 3\sigma$ , наприклад, із кроком  $\Delta R = 0,01 \text{ мкм}$  (тут  $\sigma$  – середньоквадратична похибка вимірювача, яким вимірювався радіус  $R$  вала).

Для кожного  $j$ -го значення радіуса  $R(j)$  розраховуються параметри еліпса, що наближує,  $a(j), c(j), e(j)$  у відповідності до (8), (9), (10), а також величини зазорів під датчиками  $C_1, C_3, C_5, C_7, Z_{1 \text{ розр.}}^{\varphi=45^\circ}, Z_{3 \text{ розр.}}^{\varphi=45^\circ}, Z_{5 \text{ розр.}}^{\varphi=45^\circ}, Z_{7 \text{ розр.}}^{\varphi=45^\circ}$  у відповідності до (11) і обчислюється різниця за нормою між вимірюваними і розрахованими величинами зазорів:

$$\| \bullet \| = \sqrt{\left[ Z_{1 \text{ вим.}}^{\varphi=45^\circ} - Z_{1 \text{ розр.}}^{\varphi=45^\circ} \right]^2 + \left[ Z_{3 \text{ вим.}}^{\varphi=45^\circ} - Z_{3 \text{ розр.}}^{\varphi=45^\circ} \right]^2 + \left[ Z_{5 \text{ вим.}}^{\varphi=45^\circ} - Z_{5 \text{ розр.}}^{\varphi=45^\circ} \right]^2 + \left[ Z_{7 \text{ вим.}}^{\varphi=45^\circ} - Z_{7 \text{ розр.}}^{\varphi=45^\circ} \right]^2}. \quad (12)$$

Величина малої півосі еліпса приймається рівною значенню радіуса  $R(j)$  вала, якому відповідає мінімальна норма (12). Розраховується уточнене значення великої півосі "a" еліпса, що наближає,

$$a = R(j) + \left( Z_1^{\varphi=0^\circ} - Z_1^{\varphi=90^\circ} \right) \quad (13)$$

напівфокусна відстань "c" і ексцентриситет "e". Розраховуються координати датчиків  $C_1 - C_8$  у

системах координат  $X O Y$  і  $X_1 O_1 Y_1$ . Для цього на кутах  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8$  установки датчиків для початкового  $\varphi = 0$  кутового положення вала опори обчислюються відхилення точок еліпса, що наближає перетин вала, від окружності радіуса  $R = b$  у напрямку  $i$ -го датчика по полярному радіусу еліпса:

$$\Delta\rho_i = \rho_i^{\varphi=0} - R,$$

$$\text{де } \rho_i = \sqrt{\frac{b^2}{1 - e^2 \cdot \cos^2 \alpha_i}}.$$

Співвідношення для розрахунків координат датчиків  $C_1 - C_8$  у системах координат  $X O Y$  і  $X_1 O_1 Y_1$  мають вигляд:

$$\begin{cases} [x_{C_1} = 0, y_{C_1} = R + \Delta\rho_1 + Z_1], \\ [x_{C_5} = 0, y_{C_5} = -(R + \Delta\rho_5 + Z_5)], \\ [x_{(1)C_2} = R + \Delta\rho_2 + Z_2, y_{(1)C_2} = 0], \\ [x_{(1)C_6} = -(R + \Delta\rho_6 + Z_6), y_{(1)C_6} = 0], \\ [x_{C_3} = R + \Delta\rho_3 + Z_3, y_{C_3} = 0], \\ [x_{C_7} = -(R + \Delta\rho_7 + Z_7), y_{C_7} = 0], \\ [x_{(1)C_4} = 0, y_{(1)C_4} = -(R + \Delta\rho_4 + Z_4)], \\ [x_{(1)C_8} = 0, y_{(1)C_8} = R + \Delta\rho_8 + Z_8]. \end{cases} \quad (14)$$

Для визначення координат осі обертання вала на куті  $\beta$  повороту вимірюються величини зазорів  $Z_1(\beta) - Z_8(\beta)$  і обчислюються величини відхилень точок еліпса, що наближає, від окружності радіуса  $R = b$  по полярному радіусу еліпса в напрямку на  $i$ -й датчик:

$$\rho_i^{(\beta)} = \sqrt{\frac{b^2}{1 - e^2 \cdot \cos^2(\alpha_i - \beta)}},$$

$$\Delta\rho_i^{(\beta)} = \rho_i^{(\beta)} - R.$$

Корегуються величини зазорів під датчиками  $C_1 - C_8$  на величину некруглості вала:

$$\begin{aligned} Z_{1\text{скор.}}(\beta) &= Z_1(\beta) + \Delta\rho_1^{(\beta)}, \\ Z_{2\text{скор.}}(\beta) &= Z_2(\beta) + \Delta\rho_2^{(\beta)}, \\ Z_{3\text{скор.}}(\beta) &= Z_3(\beta) + \Delta\rho_3^{(\beta)}, \\ Z_{4\text{скор.}}(\beta) &= Z_4(\beta) + \Delta\rho_4^{(\beta)}, \end{aligned}$$

$$Z_{5\text{скор.}}(\beta) = Z_5(\beta) + \Delta\rho_5^{(\beta)},$$

$$Z_{6\text{скор.}}(\beta) = Z_6(\beta) + \Delta\rho_6^{(\beta)},$$

$$Z_{7\text{скор.}}(\beta) = Z_7(\beta) + \Delta\rho_7^{(\beta)},$$

$$Z_{8\text{скор.}}(\beta) = Z_8(\beta) + \Delta\rho_8^{(\beta)}.$$

і розраховуються відстані від центрів основ датчиків  $C_1 - C_8$  до зміщеної осі обертання вала опори з (3), (4), (5), (6) у площині установки датчиків:

$$\begin{aligned} C_1 l &= R + Z_{1\text{скор.}}(\beta) & C_5 l &= R + Z_{5\text{скор.}}(\beta) \\ C_2 l &= R + Z_{2\text{скор.}}(\beta) & C_6 l &= R + Z_{6\text{скор.}}(\beta) \\ C_3 l &= R + Z_{3\text{скор.}}(\beta) & C_7 l &= R + Z_{7\text{скор.}}(\beta) \\ C_4 l &= R + Z_{4\text{скор.}}(\beta) & C_8 l &= R + Z_{8\text{скор.}}(\beta). \end{aligned} \quad (15)$$

У результаті розв'язку  $C_N^2 - 2S$  систем рівнянь утворюється надлишкова інформація про положення осі обертання, що надає можливість одержати оцінку координат осі обертання вала за методом найменших квадратів [3]:

$$\sum_{i=1}^{C_N^2 - 2S} \left[ (x(\varphi) - x_i(\varphi))^2 + (y(\varphi) - y_i(\varphi))^2 \right] = \min. \quad (16)$$

Прирівнюючи похідні від (21) по  $X$  і  $Y$  до нуля матимемо:

$$\hat{x}(\varphi) = \frac{\sum_{i=1}^{C_N^2 - 2S} x_i(\varphi)}{C_N^2 - 2S}, \quad \hat{y}(\varphi) = \frac{\sum_{i=1}^{C_N^2 - 2S} y_i(\varphi)}{C_N^2 - 2S},$$

де  $\hat{x}(\varphi)$  і  $\hat{y}(\varphi)$  – оцінки координат осі обертання вала аеростатичної шпиндельної опори в базовій системі координат  $X O Y$ . Середня квадратична похибка методу найменших квадратів розраховується за формулою:

$$\sigma_{\text{мнк}} = \frac{\sum_{i=1}^{C_N^2 - 2S} [\hat{x}(\varphi) - x_i(\varphi)]^2}{(C_N^2 - 2S) - 1}$$

і зменшується в разі збільшення числа "N" датчиків величин зазорів для обчислення координат осі

обертання в перетині аеростатичної шпindelної опори.

### Висновки

Розроблена технологія способу вимірювання координат осі обертання вала аеростатичної шпindelної опори, яка забезпечує побудову пристрою стабілізації радіального положення осі обертання вала шпindelної опори суперпрецизійного верстата. Інформація про положення осі обертання вала опори дає змогу одержати оцінку координат осі обертання за методом найменших квадратів, тобто визначати ці координати з високою точністю. Похибка вимірювань координат

осі обертання може не перевищувати 0,01 мкм.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Пинегин С. В. Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой / Пинегин С. В., Орлов А. В., Табачников Ю. Б. – М.: Машиностроение, 1984.
2. Мудров В. И. Методы обработки измерений / Мудров В. И., Кушко В. Л. – М.: Советское Радио, 1976.
3. Гутер Р. С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта / Гутер Р. С., Овчинский Б. В. – М.: Наука, 1970.



## ТРАНСФЕР ТЕХНОЛОГІЙ

### Нові матеріали і речовини

#### БІОАКТИВАТОР ДЛЯ ЛОКАЛЬНИХ ОЧИСНИХ СПОРУД І ВИГРІБНИХ ЯМ

**Призначення.** Біологічне очищення стічних вод господарчо-побутового типу.

**Сфера застосування** – житлово-комунальне господарство.

**Опис.** Біоактиватор – це суміш штучно вирощених натуральних бактерій, дріжджів і ензимів (амелаза, протеаза, ліпаза, естераза, уреаза, целюлоза, ксиланаза), які прискорюють нейтралізацію і розкладання стоків на органічні речовини. Ці мікроорганізми активно виробляють ферменти, завдяки яким досягається найкращий результат щодо зниження рівня БПК, ХПК, зважених часток, аміаку.

Біоактиватор стійкий до побутового використання миючих засобів і пральних порошків. Це екологічно безпечний натуральний продукт, який не містить хімічних речовин, повністю біологічно розкладається, нетоксичний, безпечний для людини, тварин і рослин, не псує труби.

Застосування біоактиватора сприяє підтримці екологічної рівноваги і ефективному вирішенню проблеми утилізації побутових відходів.

Біоактиватор сертифікований, відповідає вимогам санітарного законодавства України, його дозволено використовувати на території України. Висновок державної санітарно-епідеміологічної експертизи №05.03.02-03/6364 від 05.02.2010.

#### Переваги:

- у разі регулярного використання відбувається нормалізація активної бактеріальної флори, що сприяє природній біологічній переробці і знешкодженню відходів життєдіяльності людини;

- скорочує маси твердих відходів на 80%;
- усуває неприємний запах, запобігає утворенню реактивних газів;
- знищує хвороботворні мікроби;
- запобігає замулюванню (внаслідок утворення опадів на дні і згустків на поверхні) локальних очисних споруд і вигрібних ям;
- очищує і поліпшує прохідність каналізаційних і дренажних труб;
- відновлює пропускну спроможність дренажу;
- сприяє полегшенню роботи, зниженню зношування фекальних насосів і перекачувальних станцій;
- відпадає потреба у використанні асенізаційної машини. Перероблена маса не потребує додаткової утилізації.

**Стадія готовності.** Упроваджено у виробництво.

**Пропозиції щодо співробітництва** – реалізація готової продукції.

### Хімічні технології

#### АНТИКОРОЗІЙНА ПОЛІМЕРНА СТРІЧКА ХОЛОДНОГО НАНЕСЕННЯ «ПОЛІЗОЛ»

**Призначення.** Антикорозійне покриття на основі двохшарової липкої стрічки «Полізол» холодного нанесення призначене для ізоляції лінійних ділянок трубопроводів, зони зварних стиків труб, а також для ремонту пошкоджень ізоляції.

**Галузь застосування** – трубопроводи різноманітного призначення.

**Опис.** Покриття «Полізол» має багатошарову конструкцію. Складається з полімерної основи (термо-, світлостабілізований поліетилен); липкого шару на основі полімерної композиції; ґрунтовки. Загальна тов-