

СПОСІБ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРОВАНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ РАДІАЛЬНОГО ПОЛОЖЕННЯ ОСІ ОБЕРТАННЯ ВАЛА ШПИНДЕЛЬНОЇ ОПОРИ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ



В.І. Гриценко, канд. техн. наук,
В.О. Тарасов, докт. техн. наук,
В.М. Зіненко, канд. техн. наук

У статті вирішується задача розробки способу стабілізації радіального положення осі обертання вала шпindelної опори прецизійного верстата, в основі якого лежить здатність вала до самоцентрування в магнітному полі постійних магнітів, що значно спрощує пристрій управління.

Порівняльна характеристика аналітичного способу стабілізації радіального положення осі обертання вала шпindelної опори і способу, заснованого на радіальній стійкості збалансованого вала опори

Пристрій компенсації радіальних навантажень на вал радіальної аеростатичної опори [1] гарантує стабілізацію радіального положення осі обертання вала аеростатичної шпindelної опори під час дії радіального навантаження. Побудова пристрою прототипу засновується на способі вимірювання радіального зміщення осі обертових елементів верстатів [2]. Пристрій компенсації радіальних навантажень на вал радіальної аеростатичної опори забезпечує вимірювання радіального положення осі обертання вала у двох перерізах шпindelної опори, вибір її незміщеного положення і запобігання відхиленню радіального положення осі обертання вала опори відносно вибраного незміщеного положення під дією радіального навантаження, тобто стабілізацію радіального положення осі обертання.

Для здійснення стабілізації радіального положення осі обертання вала опори:

- визначаються параметри еліпса у двох перерізах вала опори площинами установки датчиків величин зазорів;

- центри еліпсів у перерізах вала опори приймаються як точки, через які проходить вісь обертання;

- визначаються координати датчиків величин зазорів, установлених у двох перерізах шпindelної опори по осях двох систем координат у кожному перерізі, центри яких суміщені з центрами зазначених еліпсів;

- за даними вимірювання величин зазорів під датчикам величин зазорів записуються системи рівнянь, які визначають координати осі обертання вала опори;

- обчислюються координати осі обертання вала шпindelної опори;

- визначається незміщене положення осі обертання вала опори;

- формується масив опорних зазорів під датчиками величин зазорів, які на дискретах кута повороту вала опори відповідають незміщеному радіальному положенню осі обертання.

У процесі стабілізації радіального положення осі обертання вала опори поточні величини зазорів під датчиками величин зазорів на дискретах кута повороту вала опори порівнюються з величинами відповідних опорних зазорів. У разі відхилення поточних величин зазорів від опорних виробляються сигнали неузгодження, які відповідають величині відхилення поточних величин зазорів від опорних, на компенсатори радіального зміщення осі обертання. Завдяки цьому попереджається зміщення осі обертання з високою точністю.

Аналітичний спосіб стабілізації радіального положення осі обертання вала опори складний в реалізації і вимагає великих апаратних затрат.

Спосіб стабілізації радіального положення осі обертання вала шпindelної опори на постійних магнітах, в основі якого лежить радіальна стійкість геометричної осі обертання збалансованого

вала опори, відносно якої балансується вал опори, реалізується значно простішим пристроєм. Масив опорних зазорів формується по вимірюванню величин зазорів між датчиками величин зазорів і збалансованим валом опори. Щодо точності спосіб не поступається аналітичному способу стабілізації.

Пристрій для реалізації інформаційно-керуваного способу стабілізації радіального положення вала шпindelної опори на постійних магнітах

Пристрій для реалізації способу стабілізації радіального положення осі обертання вала радіальної шпindelної опори на постійних магнітах (рис. 1) включає в себе установлені в перерізах опори по $B - B$ і $\Gamma - \Gamma$ магніти 5 вала, які виготовлені у формі порожнистих циліндрів з полюсами на внутрішній і зовнішній бокових поверхнях. У цих перерізах над магнітами 5 вала встановлені силові магнітні відштовхувачі 6, кожен з яких включає в себе магніт 7 силового магнітного відштовхувача і п'єзоелектричний двигун 8, який використовується для переміщення магніта 7 силового магнітного відштовхувача для зміни величини зазору між магнітом 5 вала і магнітом 7, а отже, для регулювання сили відштовхування.

У корпусі 1 опори в перерізах по $B - B$ і $\Gamma - \Gamma$ установлені по дванадцять силових магнітних відштовхувачів 6, які в кожному перерізі об'єднані в чотири групи 9, 10, 11, 12 і 13, 14, 15, 16 (по три в кожній групі) паралельно з'єднаних силових магнітних відштовхувачів 6 (рис. 2). В загальному

випадку в цих перерізах може бути встановлено n силових магнітних відштовхувачів, де n кратне чотирьом.

Групи 9, 10, 11, 12 силових магнітних відштовхувачів і магніт 5 вала в перерізі по $B - B$ опори утворюють силовий магнітний підвіс 17, групи 13, 14, 15, 16 і магніт 5 вала в перерізі по $\Gamma - \Gamma$ утворюють силовий магнітний підвіс 18 (див. рис.1; 2).

Групи 9, 10, 11, 12 і 13, 14, 15, 16 силових магнітних відштовхувачів установлюють симетрично осей систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$. Таким чином, вал опори знаходиться у зваженому стані в пружному середовищі магнітного поля силових магнітних підвісів.

П'єзоелектричні двигуни 8 установлені в ізоляторі 19. 20 – регулювальний гвинт для установлення початкового положення магнітів 7 силових магнітних відштовхувачів.

У перерізах по $A - A$ і $B - B$ опори по осях систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$, початки яких лежать на осі симетрії внутрішньої поверхні корпусу 1 опори, установлені датчики 21 величин зазорів між основами датчиків і валами 2 і 4 вала 2, 3, 4 опори. Датчики 21 установлені в керамічних втулках 22 (рис. 3).

Вимірювачі 23 величин зазорів (рис. 4) забезпечують вимірювання величин зазорів з погрішністю, яка не перевищує $10^{-3} \div 10^{-2}$ величини вимірювального зазору [5].

Напруга з вимірювачів 23 величин зазорів, яка відповідає величинам зазорів, що вимірюються,

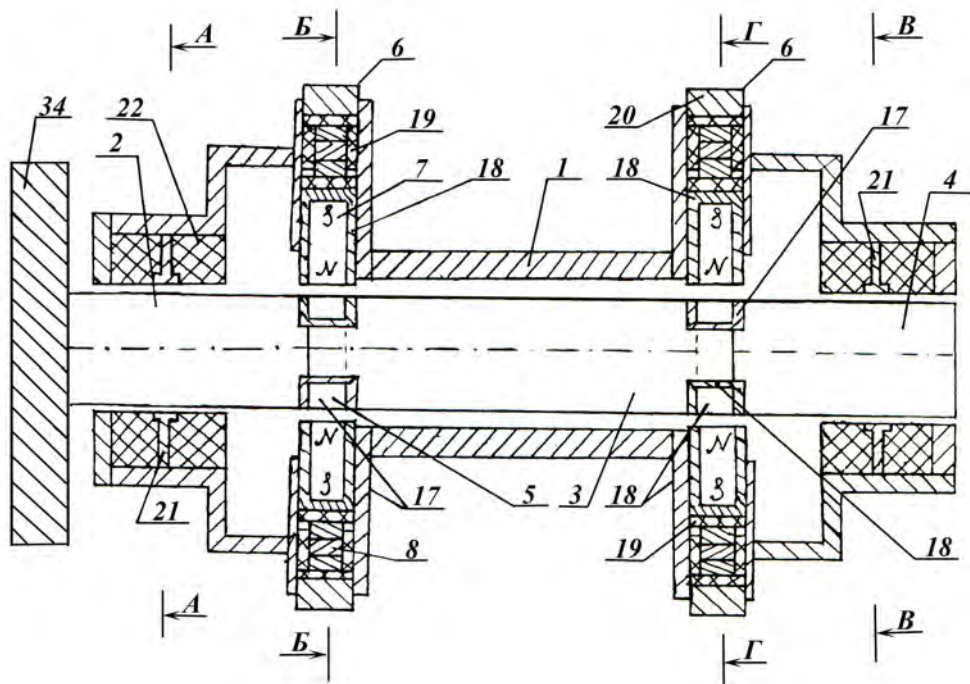


Рис. 1. Шпindelна опора на постійних магнітах (осьовий переріз)

надходить в обчислювач 24, який забезпечує:

- вибір незміщеного положення осі обертання вала 2, 3, 4;
- розрахунок величини зміщення геометричної осі обертання вала опори під дією динамічного навантаження;
- формування і зберігання масиву величин опорних зазорів.

Як обчислювач може використовуватися комп'ютер, оснащений пристроєм уводу-виводу інформації для зв'язку з зовнішніми функціональними елементами; як вимірювач 25 кута повороту вала опори може використовуватись обертальний трансформатор.

Сигнали управління для установки геометричної осі обертання вала в незміщене положення з обчислювача 24 надходять на пари операційних підсилювачів 26 і 27 (на прямий вхід операційного підсилювача 26 і інвертувальний вхід операційного підсилювача 27).

Перемикачі 28 «пряме-вимк.-зворотне» використовуються для забезпечення зміни напрямку переміщення вала 2, 3, 4 опори по відповідній осі систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$.

Диференційні підсилювачі 29, 30, 31, 32 сигналів неузгодження підсилюють сигнали управління, які надходять з пар 26 і 27 операційних підсилювачів сигналів управління, а також сигнали неузгодження між опорними зазорами і поточними величинами зазорів.

Вимикачі 33 «увімк.-вимк.» слугують для відключення диференційних підсилювачів 29, 30, 31, 32 від груп 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 силових магнітних відштовхувачів під час настроювання пристрою; вимикач 34 – для підключення вимірювачів 23 величин зазорів по датчиках 21 величин зазорів, установлених по півосях $+X^A, +Y^A, +X^B, +Y^B$ систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ до перших входів операційних підсилювачів 29, 30, 31, 32; вимикач 35 – для підключення виходів опорних зазорів обчислювач 24 до других входів диференційних підсилювачів 29, 30, 31, 32 сигналів неузгодження.

Спосіб інформаційного керування радіальним положенням осі обертання вала радіальної шпindelної опори на постійних магнітах

Спосіб передбачає такі етапи:

1. Датчики величин зазорів $C_1 - C_4$ і $C_5 - C_8$ в перерізах по $A - A$ і $B - B$ шпindelної опори на постійних магнітах установлюються по осях систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ відповідно. Осі систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ паралельні, а їхні початки лежать на осі симетрії внутрішньої поверхні корпусу опори (див. рис. 3).

2. Подача сигналів керування:

$U_{\text{од.1}}$ на групи 9 і 11 паралельно підключених силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі \tilde{O}^A системи координат $X^A O^A Y^A$ у перерізі по $B - B$ опори;

$U_{\text{упр.2}}$ на групи 10 і 12 паралельно підключених

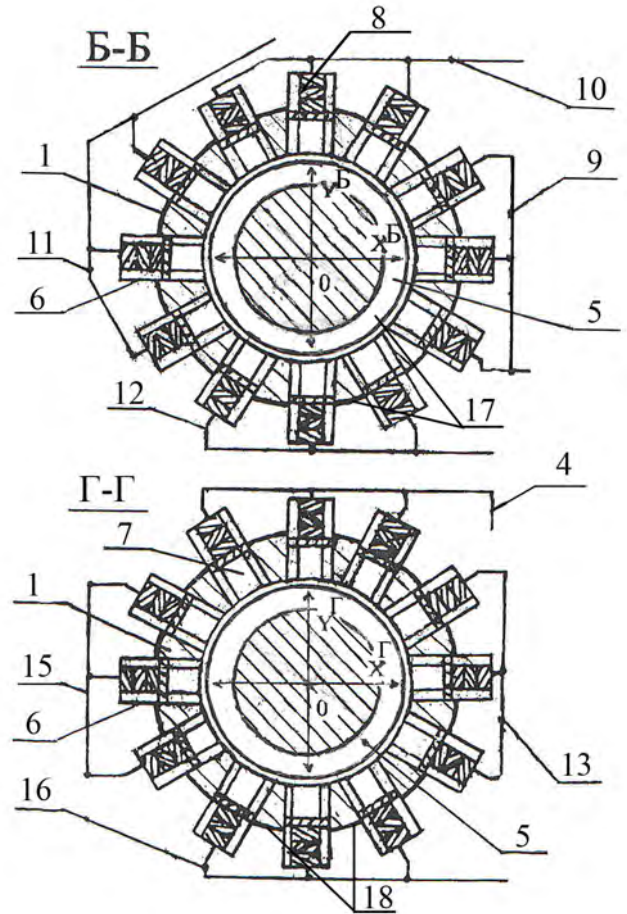


Рис. 2. Групи силових магнітних підштовхувачів у перерізах по $B - B$ і $G - G$ опори

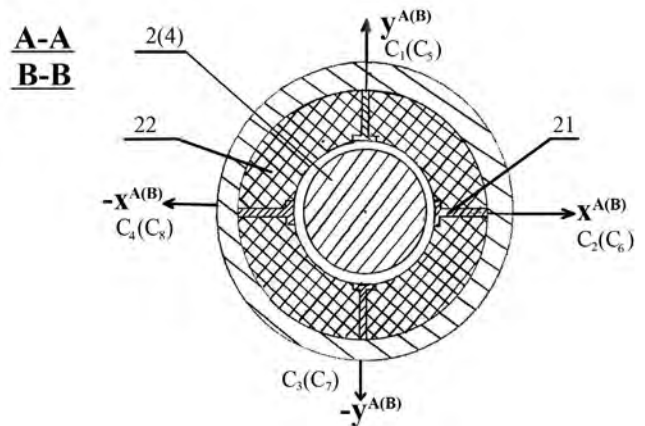


Рис. 3. Датчики величин зазорів у перерізах по $A - A$ і $B - B$ опори

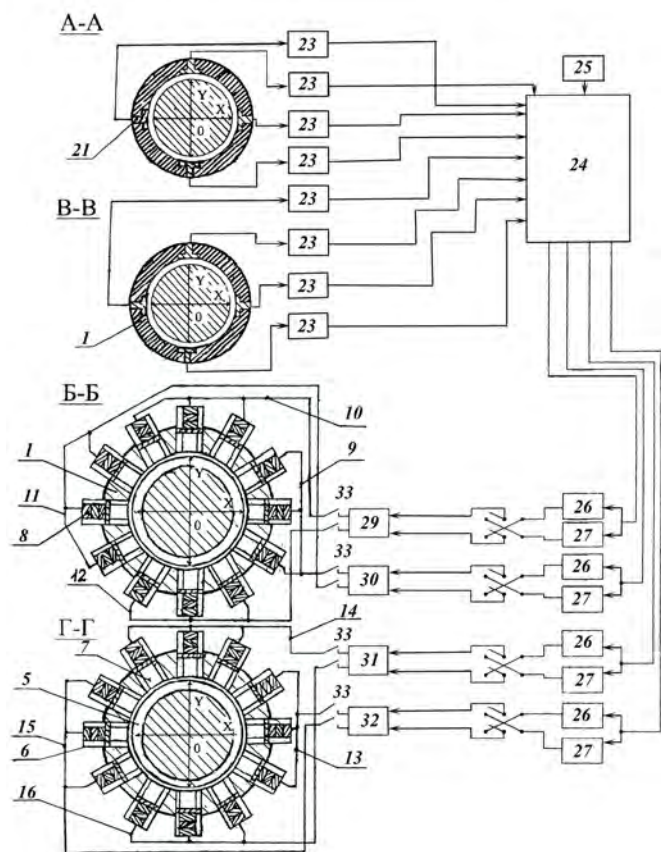


Рис. 4. Функціональна схема пристрою стабілізації радіального положення осі обертання вала шпиндельної опори на постійних магнітах

силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі Y^A системи координат $X^A O^A Y^A$ у перерізі по $B - B$ опори;

$U_{\text{від.3}}$ на групи 13 і 15 паралельно підключених силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі \tilde{O}^A системи координат $X^A O^A Y^A$ у перерізі по $\Gamma - \Gamma$ опори;

$U_{\text{від.4}}$ на групи 14 і 16 паралельно підключених силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі Y^A системи координат $X^A O^A Y^A$ у перерізі по $\Gamma - \Gamma$ опори (див. рис. 2).

Причому осі систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$, $X^A O^A Y^A$ і $X^A O^A Y^A$ паралельні, під датчиками \tilde{N}_3 і \tilde{N}_3 , \tilde{N}_2 і \tilde{N}_4 , \tilde{N}_5 і \tilde{N}_7 , \tilde{N}_6 і \tilde{N}_8 установлюють рівні величини зазорів $Z_1 = Z_3$, $Z_2 = Z_4$, $Z_5 = Z_7$, $Z_6 = Z_8$. У результаті вісь симетрії вала опори суміщається з початками систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ у перерізах по $A - A$ і $B - B$ опори і приймається як геометрична вісь обертання OO_1 вала шпиндельної опори.

3. Розраховується жорсткість радіальної шпиндельної опори на постійних магнітах.

Сила відштовхування між однойменними полюсами магнітів 7 силових магнітних відштовху-

вачів 6 і магнітами 5 вала опори розраховується за формулою

$$\bar{F}_{\text{от.}} = \frac{B_{\text{м.від.}}^2 S_{\text{м.від.}}}{\mu_0 [1 + 2l_3 / Q_{0\text{м.від.}} l_{\text{м.від.}}]^2} + \frac{B_{\text{м.вала.}}^2 S_{\text{м.вала.}}}{\mu_0 [1 + 2l_3 / Q_{0\text{м.вала.}} l_{\text{м.вала.}}]^2} \quad (1)$$

де $\hat{A}_{i,\text{від.}}$ і $\hat{A}_{i,\text{вала.}}$ – індукція магнітів відштовхувачів і магнітів вала;

S – площі полюсів магнітів;

μ_0 – магнітна постійна;

l_c – величина зазору між магнітом 7 силового магнітного відштовхувача 6 і магнітом 5 вала опори;

Q_0 – магнітна жорсткість магнітів відштовхувачів і магнітів вала.

Силові магнітні відштовхувачі в перерізах опори (див. рис. 2) об'єднані в чотири групи по три паралельно з'єднаних відштовхувачів в групі й установлені рівномірно по окружності корпусу опори зі зсувом $\alpha = 30^\circ$. При початковому зазорі l між магнітами 7 першого, другого і третього силових магнітних відштовхувачів і магнітом 5 вала опори, установлених по півосі $-Y^A$ системи координат $X^A O^A Y^A$, сили відштовхування між магнітами 7 відштовхувачів і магнітом 5 вала рівні: $R_1 = R_2 = R_3$. Результуюча сила відштовхування R^{+Y} між цією групою відштовхувачів і магнітом 5 вала в напрямку півосі $+Y^A$ дорівнює (рис.5):

$$R^{+Y} = R_1 + R_2 \sin(90^\circ - \alpha) + R_3 \sin(90^\circ - \alpha). \quad (2)$$

Нехай результуюча сила відштовхування в напрямку півосі $-Y^A$ системи координат $X^A O^A Y^A$ між магнітами 7 силових магнітних відштовхувачів, установлених по півосі $+Y^A$ цієї системи координат рівна R^{-Y} , а початковий зазор між магнітами 7 відштовхувачів і магнітом 5 вала опори – l_1 .

Навантажимо вал опори в напрямку півосей $-Y^A$ і $-Y^A$ систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^A O^A Y^A$. У результаті зазори l між магнітами 7 відштовхувачів і магнітом 5 вала, установлених по півосях $-Y^B$ і $-Y^G$, зменшилися на Δl і стали рівні $l - \Delta l$, а зазори l_1 між групами 12 і 16 силових магнітних відштовхувачів 6, установлених по півосях $+Y^A$ і $+Y^A$ систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^A O^A Y^A$, і магнітом 5 вала збільшилися і стали рівні $l + \Delta l$ і $l_1 - \Delta l$. Різниця сил відштовхування між відштовхувачами 6 і магнітами вала

$$\Delta R_1 = R_{l-\Delta l}^{+Y^A} - R_{l+\Delta l}^{-Y^A}, \quad \Delta R_2 = R_{l_1-\Delta l}^{+Y^A} - R_{l_1+\Delta l}^{-Y^A} \quad (3)$$

Отже, радіальна жорсткість c радіальної шпindelної опори на постійних магнітах

$$c = (\Delta R_1 + \Delta R_2) / \Delta l \quad (4)$$

4. Розраховуються критичні кутові швидкості $\omega_{\text{ед.і.в.}}$ і $\omega_{\text{ед.ааєа}}$ планшайби і вала шпindelної опори [4]:

$$\omega_{\text{ед.і.в.}} = \sqrt{\hat{n} / M_1}, \quad \omega_{\text{ед.ааєа}} = \sqrt{\hat{n} / M_2}, \quad (5)$$

де M_1 – маса планшайби;

M_2 – маса вала опори;

c – розрахункове значення жорсткості радіальної шпindelної опори.

5. Вал шпindelної опори встановлюється на кут повороту $\varphi = 0$. N разів вимірюються величини зазорів під датчиками C_1, C_2, C_5, C_6 . Обчислюються асимптотично незміщені оцінки

$$\hat{Z}_1^{\varphi=0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_1^{\varphi=0}(n), \quad \hat{Z}_2^{\varphi=0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_2^{\varphi=0}(n),$$

$$\hat{Z}_5^{\varphi=0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_5^{\varphi=0}(n), \quad \hat{Z}_6^{\varphi=0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_6^{\varphi=0}(n) \quad \text{під}$$

датчиками C_1, C_2, C_5, C_6 , установлених по пів-осях $+X^A, +Y^A, +X^B, +Y^B$ систем координат

$X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$. Положення геометричної осі обертання вала опори, при якому на куті $\varphi = 0$ величини зазорів під датчиками C_1, C_2, C_5, C_6 рівні вимірюваним, приймається як незміщене.

6. Валу опори задається кутова швидкість ω_1 , яка задовольняє нерівностям:

$$\omega_1 < \omega_{\text{ед.і.в.}}, \quad \omega_1 < \omega_{\text{ед.ааєа}}. \quad (6)$$

Під дією динамічного навантаження геометрична вісь обертання вала опори в площинах установки датчиків величин зазорів зміщується на r і r_1 відповідно. У момент повороту опори на кут $\varphi = 0$ повороту вала N разів на N обертах вала вимірюють величини зазорів

$\hat{Z}_{1\omega_1}^{\varphi=0}(n), \hat{Z}_{2\omega_1}^{\varphi=0}(n), \hat{Z}_{5\omega_1}^{\varphi=0}(n), \hat{Z}_{6\omega_1}^{\varphi=0}(n)$ і обчислюють їхні асимптотично незміщені оцінки

$$\hat{Z}_{1\omega_1}^{\varphi=0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_{1\omega_1}^{\varphi=0}(n), \quad \hat{Z}_{2\omega_1}^{\varphi=0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_{2\omega_1}^{\varphi=0}(n), \quad (7)$$

$$\hat{Z}_{5\omega_1}^{\varphi=0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_{5\omega_1}^{\varphi=0}(n), \quad \hat{Z} = \sum Z(n).$$

Обчислюється величина зміщення геометричної осі обертання вала в перерізах по $A-A$ і $B-B$:

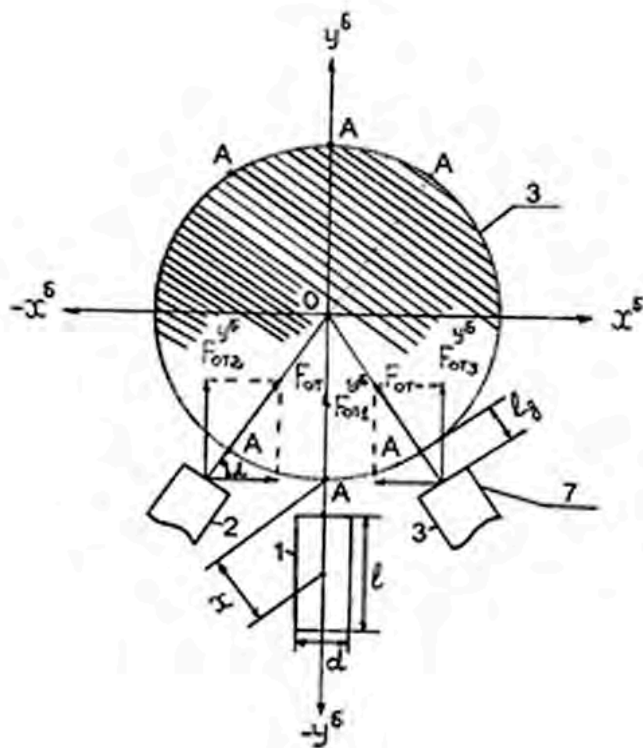


Рис. 5. До розрахунку піднімальної сили групи силових магнітних відштовхувачів

$$\Delta Y_{\omega_1}^A = \hat{Z}_1^{\varphi=0} - \hat{Z}_{1\omega_1}^{\varphi=0}, \quad \Delta X_{\omega_1}^A = \hat{Z}_2^{\varphi=0} - \hat{Z}_{2\omega_1}^{\varphi=0}, \quad (8)$$

$$\Delta Y_{5\omega_1}^{\varphi=0} = \hat{Z}_5 - \hat{Z}_{5\omega_1}^{\varphi=0}, \quad \Delta X_{\omega_1}^B = \hat{Z}_6^{\varphi=0} - \hat{Z}_{6\omega_1}^{\varphi=0}.$$

7. Розраховуються величини зміщення r і r_1 геометричної осі обертання вала в площинах установки датчиків величин зазорів

$$r = \sqrt{(\Delta X_{\omega_1}^A)^2 + (\Delta Y_{\omega_1}^A)^2}, \quad r_1 = \sqrt{(\Delta X_{\omega_1}^B)^2 + (\Delta Y_{\omega_1}^B)^2} \quad (9)$$

і кути нахилу динамічного навантаження до осей X^A, X^B систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ (рис.6):

$$\alpha = \arcsin \frac{\Delta Y_{\omega_1}^A}{\Delta X_{\omega_1}^A}, \quad \alpha_1 = \arcsin \frac{\Delta Y_{\omega_1}^B}{\Delta X_{\omega_1}^B}. \quad (10)$$

8. На кутовій швидкості ω_1 обертання вала опори збалансовують вал, наприклад за допомогою свердління й установлюють під датчиками C_1, C_2, C_5, C_6 величини зазорів $\hat{Z}_{1\omega_1}^{\varphi=0}, \hat{Z}_{2\omega_1}^{\varphi=0}, \hat{Z}_{5\omega_1}^{\varphi=0}, \hat{Z}_{6\omega_1}^{\varphi=0}$, які забезпечують мінімум норми різниць

$$\| \cdot \| = \sqrt{(\hat{Z}_1^{\varphi=0} - \hat{Z}_{1\omega_1}^{\varphi=0})^2 + (\hat{Z}_2^{\varphi=0} - \hat{Z}_{2\omega_1}^{\varphi=0})^2} \quad (11)$$

$$\| \cdot \|_1 = \sqrt{(\hat{Z}_1^{\varphi=0} - \hat{Z}_{1\omega_1}^{\varphi=0})^2 + (\hat{Z}_2^{\varphi=0} - \hat{Z}_{2\omega_1}^{\varphi=0})^2}$$

У результаті геометрична вісь обертання вала опори на кутовій швидкості ω_1 буде встановлена в незміщене положення або наблизиться до нього.

9. З кроком $\Delta\omega$ послідовно підвищують кутову швидкість обертання вала опори, де $\omega_{\text{ед.}} - \Delta$ – кутова швидкість обертання вала опори в Δ -оточенні критичної швидкості обертання.

На кожній дискреті кутової швидкості обертання вала шпindelьної опори виконують п.6, п.7, п.8 і збалансовують вал опори. Після виконання балансування на κ -му кроці підвищення кутової швидкості в момент повороту вала на кут $\varphi = 0$ N разів на N поворотах вала вимірюють величини зазорів під датчиками 21 C_1, C_2, C_5, C_6 . Обчислюють їхні асимптотично незміщені оцінки $\hat{Z}_{1\omega_1}, \hat{Z}_{2\omega_1}, \hat{Z}_{5\omega_1}, \hat{Z}_{6\omega_1}$ і перевіряють виконання рівностей

$$\hat{Z}_{1\omega_2} = \hat{Z}_1, \hat{Z}_{2\omega_2} = \hat{Z}_2, \hat{Z}_{5\omega_2} = \hat{Z}_5, \hat{Z}_{6\omega_2} = \hat{Z}_6. \quad (12)$$

Якщо хоча б одна з рівностей не виконується, вал опори не буде відцентрованою. Обчислюють величини зміщення r і r_1 геометричної осі

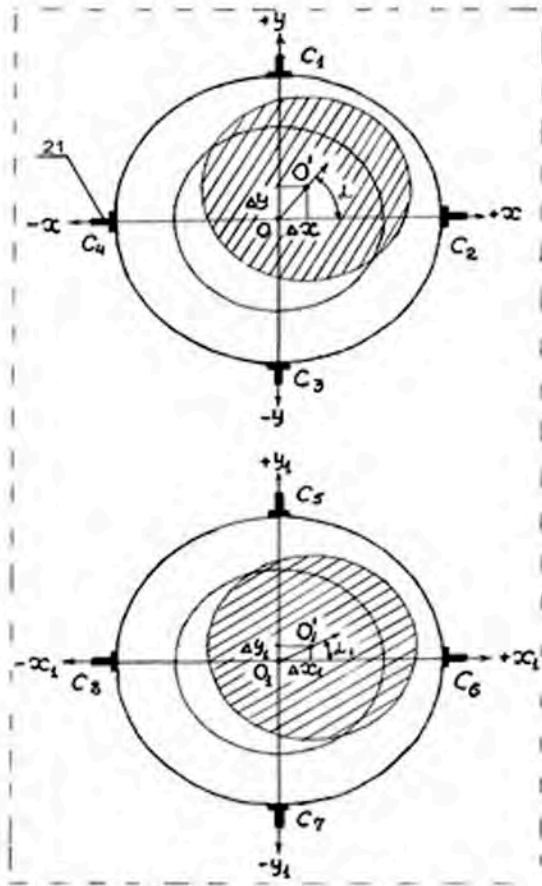


Рис. 6. Величина і напрямок зміщення вала опори під дією динамічного навантаження

обертання вала в площинах установки датчиків величин зазорів у відповідності до (9) і кути нахилу векторів динамічного навантаження до осей X^A, X^B систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ у відповідності до (10). На черговій дискреті кутової швидкості вала опори виконують п.8. Балансують вал і установлюють під датчиками C_1, C_2, C_5, C_6 величини зазорів, які забезпечують мінімум норми (11). Якщо на черговій дискреті кутової швидкості $\|\cdot\|_{\omega_{\text{ед.}}-\Delta} \rightarrow 0$ вал шпindelьної опори на постійних магнітах збалансований з високою точністю, центри ваги планшайби і вала опори лежать на геометричній осі обертання вала радіальної шпindelьної опори.

10. Валу шпindelьної опори задається робоча $\omega_{\text{р.д.}}$ кутова швидкість обертання. На кожній дискреті кута повороту вала $\omega_1 + \Delta\omega, \omega_1 + 2\Delta\omega, \omega_1 + 3\Delta\omega, \dots, \omega_1 + k\Delta\omega, \dots, \omega_{\text{кр.}} - \Delta$ на N обертах вала N разів вимірюють величини зазорів :

$$\begin{aligned} \hat{Z}_1^{\varphi=0}, \hat{Z}_1^{\varphi=\Delta\omega}, \hat{Z}_1^{\varphi=2\Delta\omega}, \hat{Z}_1^{\varphi=3\Delta\omega}, \dots, \hat{Z}_1^{\varphi=360^\circ-\Delta\omega} \\ \hat{Z}_2^{\varphi=0}, \hat{Z}_2^{\varphi=\Delta\omega}, \hat{Z}_2^{\varphi=2\Delta\omega}, \hat{Z}_2^{\varphi=3\Delta\omega}, \dots, \hat{Z}_2^{\varphi=360^\circ-\Delta\omega} \\ \hat{Z}_5^{\varphi=0}, \hat{Z}_5^{\varphi=\Delta\omega}, \hat{Z}_5^{\varphi=2\Delta\omega}, \hat{Z}_5^{\varphi=3\Delta\omega}, \dots, \hat{Z}_5^{\varphi=360^\circ-\Delta\omega} \\ \hat{Z}_6^{\varphi=0}, \hat{Z}_6^{\varphi=\Delta\omega}, \hat{Z}_6^{\varphi=2\Delta\omega}, \hat{Z}_6^{\varphi=3\Delta\omega}, \dots, \hat{Z}_6^{\varphi=360^\circ-\Delta\omega} \end{aligned} \quad (13)$$

під датчиками C_1, C_2, C_5, C_6 величин зазорів, розраховують їх асимптотично незміщені оцінки і приймають як опорні величини зазорів, які на дискретах кута повороту вала відповідають незміщеному положенню осі обертання вала опори

$$\begin{aligned} \hat{Z}_{1\text{оп.}}^{\varphi=0}, \hat{Z}_{1\text{оп.}}^{\varphi=\Delta\omega}, \hat{Z}_{1\text{оп.}}^{\varphi=2\Delta\omega}, \hat{Z}_{1\text{оп.}}^{\varphi=3\Delta\omega}, \dots, \hat{Z}_{1\text{оп.}}^{\varphi=360^\circ-\Delta\omega} \\ \hat{Z}_{2\text{оп.}}^{\varphi=0}, \hat{Z}_{2\text{оп.}}^{\varphi=\Delta\omega}, \hat{Z}_{2\text{оп.}}^{\varphi=2\Delta\omega}, \hat{Z}_{2\text{оп.}}^{\varphi=3\Delta\omega}, \dots, \hat{Z}_{2\text{оп.}}^{\varphi=360^\circ-\Delta\omega} \\ \hat{Z}_{5\text{оп.}}^{\varphi=0}, \hat{Z}_{5\text{оп.}}^{\varphi=\Delta\omega}, \hat{Z}_{5\text{оп.}}^{\varphi=2\Delta\omega}, \hat{Z}_{5\text{оп.}}^{\varphi=3\Delta\omega}, \dots, \hat{Z}_{5\text{оп.}}^{\varphi=360^\circ-\Delta\omega} \\ \hat{Z}_{6\text{оп.}}^{\varphi=0}, \hat{Z}_{6\text{оп.}}^{\varphi=\Delta\omega}, \hat{Z}_{6\text{оп.}}^{\varphi=2\Delta\omega}, \hat{Z}_{6\text{оп.}}^{\varphi=3\Delta\omega}, \dots, \hat{Z}_{6\text{оп.}}^{\varphi=360^\circ-\Delta\omega} \end{aligned} \quad (14)$$

11. У процесі стабілізації радіального положення осі обертання вала радіальної шпindelьної опори на постійних магнітах поточні величини зазорів під датчиками величин зазорів C_1, C_2, C_5, C_6 на дискретах кута повороту вала порівнюються з величинами опорних зазорів. У разі відхилення поточних величин зазорів від опорних виробляються сигнали неузгодження на групи силових магнітних відштовхувачів, установлених по осях систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ у перерізах по $B-B$ і $\Gamma-\Gamma$ шпindelьної опори, які

відповідають величинам цих відхилень і запобігають радіальному відхиленню осі обертання вала радіальної шпиндельної опори на постійних магнітах.

Робота пристрою реалізації інформаційно-керованого способу стабілізації радіального положення вала радіальної шпиндельної опори на постійних магнітах

Функціонування пристрою починається з підготовки його до роботи: перемикачі «пряме-вимк.-зворотне» встановлюються в положення «вимк.»; вимикачі «увімк.-вимк.» – в положення «увімк.». Виконується пуск підпрограми обчислювача «установка величин зазорів». У відповідності до алгоритму роботи підпрограми величини зазорів під датчиками $C_1 \div C_4$ і $C_5 \div C_8$ відображуються на екрані дисплея. Подаючи сигнали керування $U_{\alpha\delta.1}$, $U_{\alpha\delta.2}$, $U_{\alpha\delta.3}$, $U_{\alpha\delta.4}$ на пари операційних підсилювачів і встановлюючи перемикачі «пряме-вимк.-зворотне» залежно від потрібного напрямку зміщення вала під датчиками величин зазорів $\tilde{N}_1^3 \tilde{N}_3$, $\tilde{N}_2^3 \tilde{N}_4$, $\tilde{N}_5^3 \tilde{N}_7$, $\tilde{N}_6^3 \tilde{N}_8$, установлених по одній осі систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$, отримують рівні величини зазорів: $Z_1 = Z_3$, $Z_2 = Z_4$, $Z_5 = Z_7$, $Z_6 = Z_8$.

Далі розраховується жорсткість шпиндельної опори на постійних магнітах. Нехай після установки рівних величин зазорів під датчиками величин зазорів величини зазорів під магнітами відштовхувачів 6 груп силових магнітних відштовхувачів 9 ÷ 16, установлених по осях систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$, становлять, наприклад 100 мкм. В обчислювач вводять магнітну індукцію $B_{\text{рід}}$ магнітів силових магнітних відштовхувачів, магнітну індукцію магнітів вала $B_{\text{вала}}$, площу полюсів S_M магнітів відштовхувачів і магнітів вала, магнітну постійну μ_0 , довжину магнітів l_1 , величини зазорів l_C при яких будуть розраховуватися сили відштовхування, θ_0 – магнітну жорсткість. Вал опори навантажують у напрямку півосей $-Y^A$ і $-Y^B$ систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ і під датчиками C_3 і C_7 установлюють, наприклад, величини зазорів 90 мкм, а під датчиками C_1 і C_5 величини зазорів 110 мкм. Розраховуються сили відштовхування між силовим магнітним підштовхувачем 6 і магнітом 5 вала для зазорів 90 і 110 мкм за формулою (1).

Розраховують сили відштовхування між групами 10 і 12, 14 і 16 силових магнітних відштовхувачів і магнітами вала за формулою

$$R_{\text{від. зрину}} = R + 2R \sin \pi / 3. \quad (15)$$

Розраховують різниці сил відштовхування між групами 10 і 12, 14 і 16 силових магнітних відштовхувачів в напрямку півосей $+Y$ і $+Y_1$

$$\Delta R_1 = R_{90}^{+Y^A} - R_{110}^{+Y^A}, \quad \Delta R_2 = R_{90}^{+Y^B} - R_{110}^{+Y^B}. \quad (16)$$

Обчислюється жорсткість радіальної шпиндельної опори на постійних магнітах за формулою (4).

Виконується пуск підпрограми обчислювача «розрахунок критичних швидкостей обертання». У відповідності до алгоритму роботи підпрограми розраховуються критичні кутові швидкості планшайби $\omega_{\text{ед. і в.}}$ і вала $\omega_{\text{ед. аааа}}$. згідно з (5).

Вал шпиндельної опори установлюється на кут повороту $\varphi = 0$. Виконується пуск підпрограми обчислювача «вимірювання і оцінювання величин зазорів 1». У відповідності до алгоритму роботи підпрограми обчислювач N разів опитує вимірювачі величин зазорів по сигналах датчиків C_1, C_2 і C_5, C_6 . Обчислюються асимптотично незміщені оцінки $\hat{Z}_1^{\varphi=0}$, $\hat{Z}_2^{\varphi=0}$, $\hat{Z}_5^{\varphi=0}$, $\hat{Z}_6^{\varphi=0}$ величин цих зазорів. Складовому валу 2, 3, 4 опори задається кутова швидкість обертання ω_1 , яка задовольняє умови: $\omega_1 < \omega_{\text{ед. і в.}}$; $\omega_1 < \omega_{\text{ед. аааа}}$. Виконується пуск підпрограми обчислювача «вимірювання і оцінювання величин зазорів 2». У відповідності до алгоритму роботи підпрограми обчислювач на N обертах вала на куті повороту $\varphi = 0$ опитує вимірювачі величин зазорів за сигналами датчиків C_1, C_2 і C_5, C_6 . обчислюються асимптотично незміщені оцінки $\hat{Z}_{1\omega_1}^{\varphi=0}$, $\hat{Z}_{2\omega_1}^{\varphi=0}$, $\hat{Z}_{5\omega_1}^{\varphi=0}$, $\hat{Z}_{6\omega_1}^{\varphi=0}$ величин цих зазорів згідно з (7).

Виконується пуск підпрограми обчислювача «розрахунок величини зміщення геометричної осі обертання вала опори і кута нахилу векторів динамічного навантаження до осей X^A і X^B систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ ». У відповідності до алгоритму роботи підпрограми на куті $\varphi = 0$ повороту вала обчислюються величини відхилень $\Delta X_{\omega_1}^A, \Delta Y_{\omega_1}^A, \Delta X_{\omega_1}^B, \Delta Y_{\omega_1}^B$ величин зазорів під датчиками C_1, C_2 і C_5, C_6 на кутовій швидкості обертання ω_1 відносно величин зазорів під цими датчиками при незміщеному положенні геометричної осі обертання вала на тому ж куті $\varphi = 0$ повороту вала.

Розраховуються величини зміщення r і r_1 геометричної осі обертання вала в площинах установки датчиків величин зазорів і кут нахилу динамічного навантаження до осей X^A і X^B систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ (див. рис. 6):

$$\begin{aligned} \Delta X^A(\omega_1) &= \hat{Z}_2^{\varphi=0} - \hat{Z}_{2\omega_1}^{\varphi=0}; \Delta Y^A(\omega_1) = \hat{Z}_1^{\varphi=0} - \hat{Z}_{1\omega_1}^{\varphi=0}; \\ \Delta X^B(\omega_1) &= \hat{Z}_7^{\varphi=0} - \hat{Z}_{7\omega_1}^{\varphi=0}; \Delta Y^B(\omega_1) = \hat{Z}_6^{\varphi=0} - \hat{Z}_{6\omega_1}^{\varphi=0}; \\ r &= \sqrt{(\Delta X^A(\omega_1))^2 + (\Delta Y^A(\omega_1))^2}; \\ r_1 &= \sqrt{(\Delta X^B(\omega_1))^2 + (\Delta Y^B(\omega_1))^2} \\ \alpha &= \arcsin \frac{\Delta Y^A}{\Delta X^A}; \alpha_1 = \arcsin \frac{\Delta Y^B}{\Delta X^B}. \end{aligned} \quad (17)$$

З використанням методу послідовних наближень виконується балансування вала опори, наприклад, свердлінням. Послідовно виконується пуск підпрограми «балансування». У відповідності до алгоритму роботи підпрограми на кожному кроці балансування на кутовій швидкості ω_1 обчислювач N раз опитує вимірювачі величин зазорів. Обчислюються: оцінки $\hat{Z}_{1\omega_1}^{\varphi=0}$, $\hat{Z}_{2\omega_1}^{\varphi=0}$, $\hat{Z}_{5\omega_1}^{\varphi=0}$, $\hat{Z}_{6\omega_1}^{\varphi=0}$; різниці за нормою між оцінками величин зазорів, які відповідають незміщеному положенню геометричної осі обертання вала і оцінками цих величин зазорів чергового кроку балансування на ω_1 кутовій швидкості ω_1 згідно з (1).

За досягнення мінімуму норм (11) на кутовій швидкості ω_1 геометрична вісь обертання вала займе близьке до незміщеного положення або незміщене положення. Якщо норма (11) не рівна нулю на швидкості обертання ω_1 вала, підвищують швидкість обертання вала з кроком $\Delta\omega$. На черговому дискретному значенні кутової швидкості виконується пуск підпрограм «розрахунок величини зміщення геометричної осі обертання вала і кута нахилу вектора динамічного навантаження до осей X^A і X^B систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^A O^A Y^A$ » і «балансування». Досягають рівності нулю норм (11). При цьому вал шпindelльної опори буде збалансований з високою точністю, центри інерції планшайби 36 і складового вала 2, 3, 4 лежатимуть на геометричній осі обертання вала опори, яке буде здійснюватися без зміщення навколо геометричної осі обертання.

Валу опори задається робоча ω_{di} швидкість обертання і виконується пуск підпрограми «формування масиву величин опорних зазорів». У відповідності до алгоритму підпрограми на дискретах кута повороту вала $\omega_1 + \Delta\omega$, $\omega_1 + 2\Delta\omega$, $\omega_1 + 3\Delta\omega, \dots, \omega_1 + k\Delta\omega, \dots, \omega_{кр}$. $-\Delta$ на N обертах вала N разів вимірюють величини зазорів під датчиками C_1, C_2 і C_3, C_6 . Розрахову-

ють асимптотично незміщені оцінки величин цих зазорів і приймають їх як опорні зазори, що відповідають незміщеному положенню геометричної осі обертання вала опори. Після формування масиву величин опорних зазорів (14) закінчується підготовчий етап роботи пристрою, і він переводиться в режим «стабілізація», для чого перемикачі 28 устанавлюються в положення «вимк.». Операційні підсилювачі 26 і 27 відключаються від входів диференціальних підсилювачів 29, 30, 31, 32 сигналів неузгодження; вимикачі 34 і 35 устанавлюються в положення «увімк.»; виходи вимірювачів за допомогою вимикача 34 підключаються до перших входів диференціальних підсилювачів 19, 30, 31, 32. Величини опорних зазорів з обчислювача через вимикач 35 надходять на другі входи диференціальних підсилювачів.

У процесі стабілізації радіального положення осі обертання вала радіальної шпindelльної опори на постійних магнітах поточні значення величин зазорів під датчиками величин зазорів \tilde{N}_1, \tilde{N}_2 і \tilde{N}_5, \tilde{N}_6 з вимірювачів надходять на перші входи диференціальних підсилювачів. На другі входи цих підсилювачів надходить напруга величин опорних зазорів, яка на дискретах кута повороту вала опори відповідає незміщеному положенню осі обертання вала. У разі відхилення поточних величин зазорів від опорних виробляються сигнали неузгодження на групи силових магнітних відштовхувачів, устанавлених по осях систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^A O^A Y^A$ у перерізах по $B - B$ і $\Gamma - \Gamma$ радіальної шпindelльної опори, які відповідають величині цього відхилення і запобігають зміщенню осі обертання вала опори з незміщеного положення.

Висновки

Результати роботи можуть бути використані для побудови прецизійних верстатів зі шпindelльними опорами на постійних магнітах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пат. 25727 А Україна. Пристрій компенсації радіальних навантажень на вал радіальної шпindelльної опори; заявл. 30. 10. 98.
2. Пат. 2572 А Україна. Спосіб вимірювання радіального зміщення обертових елементів верстатів; заявл. 30. 10. 98.
3. Пятин Ю.М. Постоянные магниты. – М.: Энергия, 1980.
4. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах. – М.: Энергия, 1997.
5. Гриневич Б.Ф. Измерительные компенсационно-измерительные устройства с емкостными датчиками. – К.: Наукова Думка, 1987.