

## СИНТЕЗ СУМІЩЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРОВАНИХ ОПОР НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ



**В.О. Тарасов**, *докт. техн. наук*,  
**В.М. Зіненко**, *канд. техн. наук*

### Порівняльна характеристика суміщених шпindelьних опор з аеростатичними опорами і опорамі на постійних магнітах

Суміщена шпindelьна опора [1], містить в одному вузлі газові опори і опори кочення, між якими по осях двох систем координат у двох перерізах опори установлені датчики величин зазорів між основами цих датчиків і валом опори. Між датчиками величин зазорів також у двох перерізах суміщеної опори встановлені однорядні аеростатичні опори з регульованою піднімальною силою, які складаються з регуляторів тиску в газовому шарі під цими однорядними аеростатичними опорами. Регулятори тиску в газовому шарі опори об'єднані в групи регуляторів тиску, які забезпечують керування положенням вала опори прототипу.

Датчики величин зазорів і однорядні аеростатичні опори з примусово регульованою піднімальною силою утворюють компенсатори радіальних навантажень на суміщену шпindelьну опору. Між однорядними аеростатичними опорами виконана радіальна двохрядна аеростатична шпindelьна опора, яка сприймає основне навантаження на суміщену шпindelьну опору.

Пристрій суміщеної шпindelьної опори складається з таких блоків: вибору незміщеного положення осі обертання вала опори (опори кочення працюють без навантаження); керування положенням осі обертання вала опори; формування опорної напруги; керування положенням осі обертання вала суміщеної шпindelьної опори, які забезпечують роботу шпindelьної опори без навантаження опор кочення.

Суміщена шпindelьна опора з аеростатичними опорами працює без навантаження опор кочення за винятком аварійних ситуацій і забезпечує високу точність стабілізації радіального положення осі обертання вала опори, але має складну кон-

струкцію, складний пристрій керування. Крім того, вона енергоємна, оскільки потребує витрат газу на піддув аеростатичних опор.

**Мета роботи** – спрощення конструкції суміщеної шпindelьної опори шляхом заміни в ній аеростатичних радіальних опор силовими магнітними підвісами на постійних магнітах, а також спрощення пристрою керування шляхом побудови його на основі явища стійкості радіального положення збалансованого вала, яка визначається радіальним навантаженням на вал суміщеної шпindelьної опори, при якому радіальне зміщення вала (осі обертання вала), збалансованого з високою точністю відносно геометричної осі обертання, не перевищує допустимого. Така суміщена шпindelьна опора на постійних магнітах може використовуватися в авіаційних двигунах, де максимальне навантаження відоме і не перевищує стійкості радіального положення збалансованого вала.

Заміна в суміщеній шпindelьній опорі радіальних аеростатичних опор на радіальні опори на постійних магнітах має ряд переваг перед останньою. Для радіальних опор на постійних магнітах не потрібні витрати газу. Необхідність у використанні компресорної установки відпадає. Отже, така суміщена шпindelьна опора є енергозберігаючою. Крім того, відпадає необхідність компенсації радіального зміщення осі обертання вала опори через нестабільність тиску газу, який надходить на піддув опори. Аеростатичні опори складні у виготовленні. Зазори в цих опорах (товщина газового шару) становлять 10 – 30 мкм, тому на кінцевій стадії виготовлення потрібна ручна доводка. Зазори в суміщених шпindelьних опорах на постійних магнітах між магнітами силових магнітних відштовхувачів і магнітами вала залежно від величини магнітної індукції магнітів становить 100 мкм і більше.

Стосовно несучої здатності, то опори на постійних магнітах із закритичних матеріалів з коерцитивною силою (300 – 500) кА/м і магнітною індукцією (1.2 – 2) Тл не поступаються аеростатичним опорам [2].

Аеростатичні опори схильні до корозії. Жиклери подачі газу в цих опорах засмічуються і потребують періодичного очищення.

Розмагнічування магнітів, виконаних із закритичних матеріалів, не перевищує (0.2 – 0.5) % за рік. Якщо магніт підлягав магнітній стабілізації, вдається знизити незворотне зменшення магнітної індукції до соті частки відсотка [3]. Магнітна індукція може повністю відновлюватися під час наступного намагнічування. Отже, опори на постійних магнітах довговічні.

### Побудова шпindelної опори на постійних магнітах

Суміщена шпindelна опора на постійних магнітах включає в себе (рис.1) корпус 1 опори;

установлений складовий вал 2, 3, 4, що складається із співоснов'єднаних валів 2, 3, 4 одного діаметра. По краях вала 3 в перерізах опори по Б – Б і Г – Г установлені магніти 5 вала, які виготовлені у формі порожнистих циліндрів з полюсами на внутрішній і зовнішній бокових поверхнях. У цих же перерізах над магнітами 5 вала установлені силові магнітні відштовхувачі 6, кожен з яких включає в себе магніт 7 силового магнітного відштовхувача і п'єзоелектричний двигун 8, який використовують 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 Б – Б і Г – Г 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). У загальному

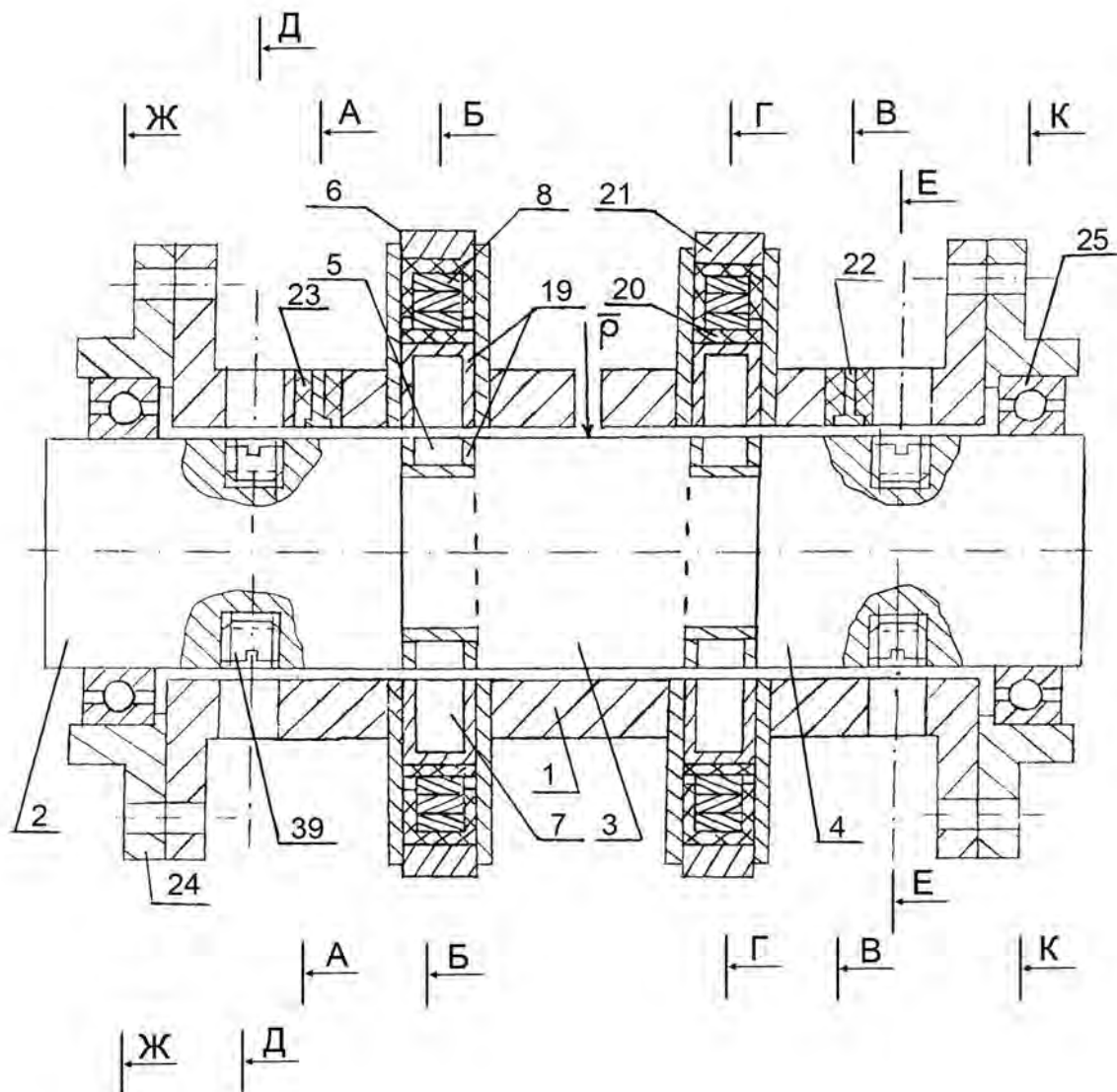


Рис.1. Суміщена шпindelна опора на постійних магнітах (осьовий переріз)

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.

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  $X^{\Gamma} O^{\Gamma} Y^{\Gamma}$ . При цьому вал опори знаходиться у зваженому стані в пружному середовищі магнітного поля магнітних силових підвісів.

Для концентрації магнітного поля в зазорах між магнітами 5 і 7 магніти 5 вала і магніти 7 силових магнітних відштовхувачів установлені в екрани 19. П'єзоелектричні двигуни 8 установлені в ізолятори 20. 21 – 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 22 величин зазорів між основами датчиків і валами 2 і 4 вала

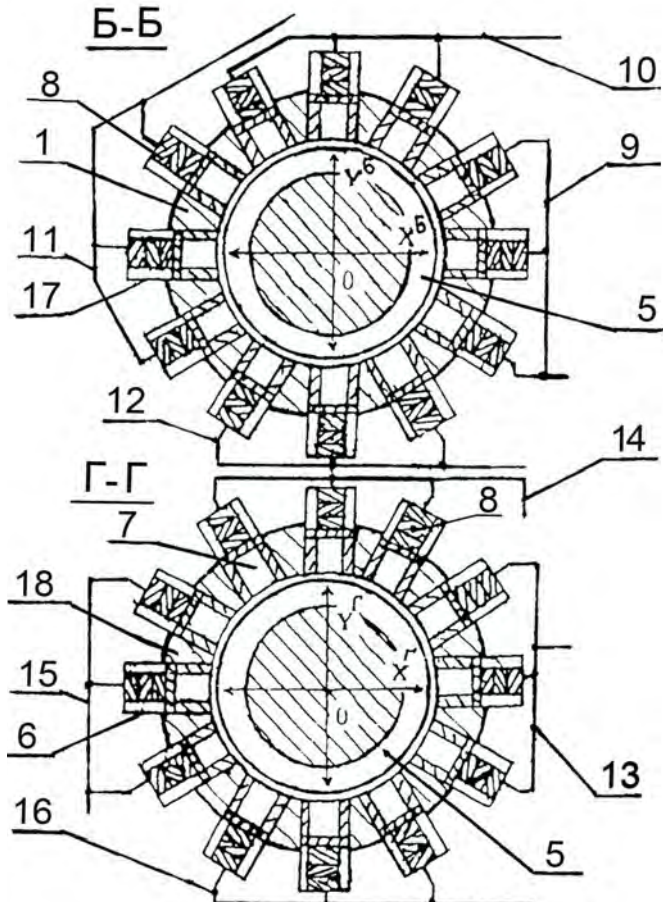


Рис.2. Групи силових магнітних відштовхувачів

2, 3, 4 опори. Датчики 22 установлені в керамічних втулках 23 (рис.1, 3).

У фланцях 24, які прикріплені до торців корпусу 1, розміщені опори 25 кочення, в яких установлені вали 2 і 4 складового вала 2, 3, 4 суміщеної шпindelної опори.

Блок 26 вибору незміщеного положення і балансування складового вала суміщеної шпindelної опори на постійних магнітах включає в себе вимірювачі 27 величин зазорів (рис.4), які забезпечують вимірювання величин зазорів з погрішністю, яка не перевищує  $10^{-3} \div 10^{-2}$  величини зазору, що вимірюється [4].

Напруги з вимірювачів 27 величин зазорів, які відповідають величинам зазорів, що вимірюються, надходять в обчислювач 28, який забезпечує:

- вибір незміщеного положення осі обертання вала 2, 3, 4;
- розрахунок величини зміщення геометричної осі обертання вала опори під дією динамічного навантаження.

Як обчислювач 28 може використовуватися комп'ютер, оснащений пристроєм уводу-виводу інформації для зв'язку з зовнішніми функціональними елементами; як вимірювач 29 кута повороту вала опори – обертальний трансформатор.

Сигнали керування для установки геометричної осі обертання вала в незміщене положення з обчислювача 28 надходять на пари операційних підсилювачів 30 і 31 (на прямий вхід операційного підсилювача 30 і інвертувальний вхід операційного підсилювача 31).

Перемикачі 32 «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  $X^B O^B Y^B$ ; 33, 34, 35, 36 – диференційні підсилювачі сигналів керування, які надходять з пар 30 і 31 операційних

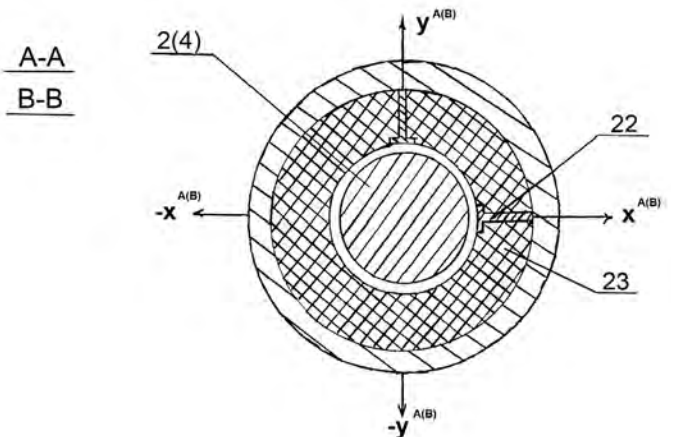


Рис.3. Датчики величин зазорів в перерізах по  $A - A$  і  $B - B$  суміщеної опори

підсилювачів сигналів керування.

Вимикачі 37 «увімк.–вимк.» використовують для відключення диференційних підсилювачів 33, 34, 35, 36 від груп 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 силових магнітних відштовхувачів під час настроювання пристрою.

### Робота шпindelної опори на постійних магнітах

Працює суміщена шпindelна опора на постійних магнітах так: перший етап – підготовка пристрою до роботи. Перемикачі «пряме–вимк.–зворотне» встановлюються в положення «вимк.». Вимикачі «увімк.–вимк.» встановлюються в положення «увімк.». Виконується пуск підпрограми обчислювача «Установка рівних колових зазорів в опорах кочення». Вал 2, 3, 4 опори встановлюють на фіксований кут повороту. З обчислювача по-

дають сигнал керування  $U_{\alpha \delta, 2}$ , який через пару операційних підсилювачів 30 і 31, перемикач «пряме–вимк.–зворотне» в положенні «пряме», диференційний підсилювач 34 надходить на групи 9 і 11 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі  $\tilde{O}^A$  системи координат  $X^A O^A Y^A$ . Вал зміщують в напрямку півосі  $+\tilde{O}^A$  (рис.5). Величина зазору під датчиком величини зазору  $\tilde{N}_2$ , встановленого по півосі  $+\tilde{O}^A$ , зменшується. Сигнал керування  $U_{\alpha \delta, 2}$  збільшують до величини, при якій величина зазору  $Z_2$  під датчиком  $C_2$  не зменшується, тобто зазор в опорі кочення 25 у перерізі по Ж – Ж опори в напрямку півосі  $+\tilde{O}^A$  повністю вибраний. Запам'ятовується величина зазору  $Z_{2min}$ . Перемикач 32 встановлюють у положення «зворотне» і змінюють полярність

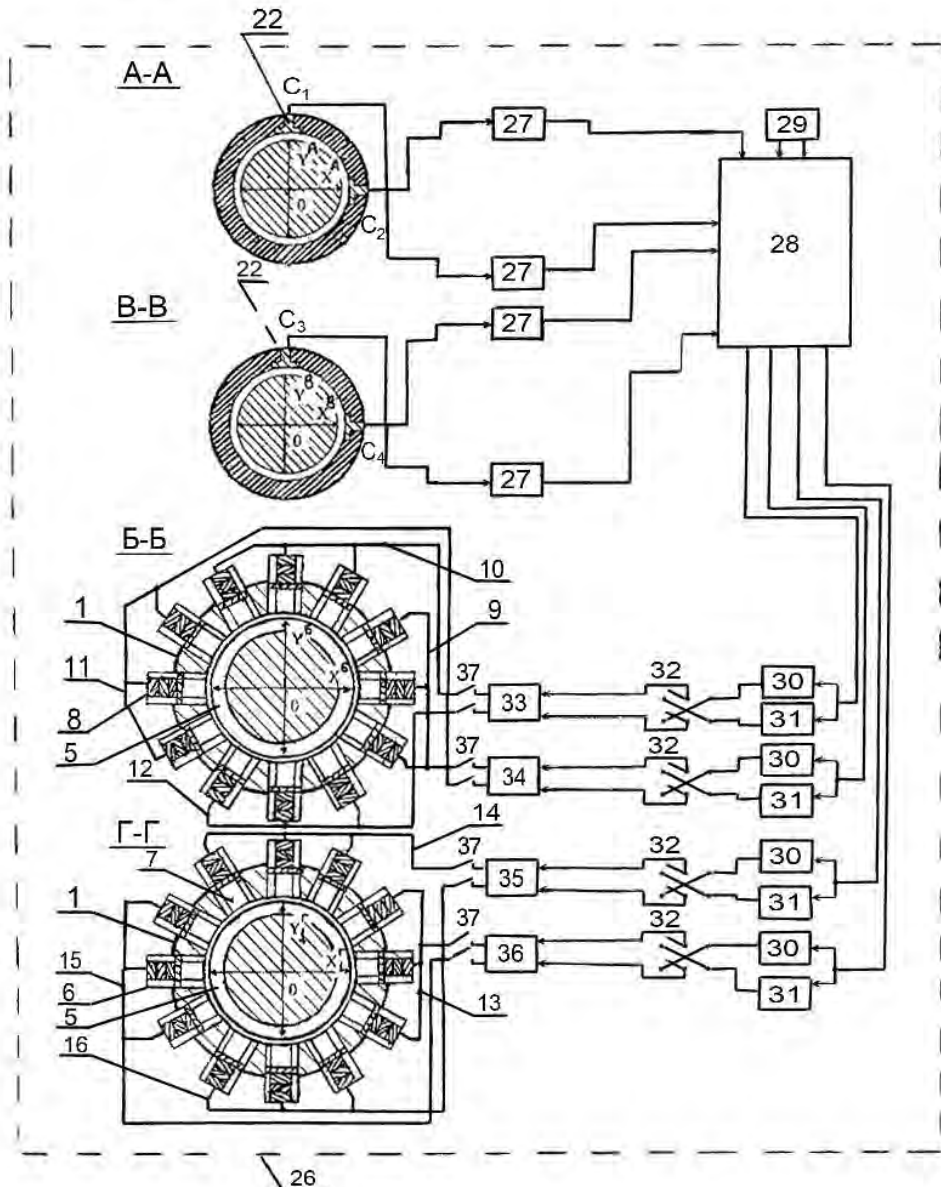


Рис.4. Функціональна схема блока вибору незаміщеного положення і балансування вала суміщеної шпindelної опори на постійних магнітах

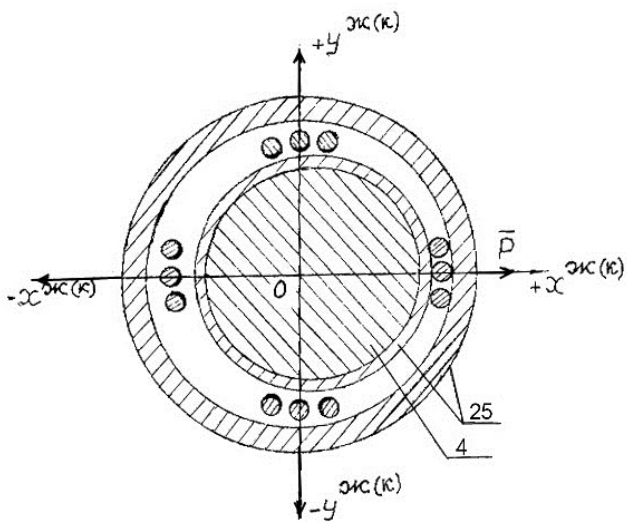


Рис.5. Вибірка зазорів в опорах кочення

сигналу керування на диференційний підсилювач. Вал 2, 3, 4 опори буде зміщуватись у напрямку півосі  $-\tilde{O}^A$ . Збільшують сигнал керування  $U_{\tilde{\alpha} \delta.1}$  до величини, при якій величина зазору під датчиком  $C_2$  не зростає, тобто зазор в опорі 25 кочення в напрямку півосі  $-\tilde{O}^A$  буде вибраний. Величина зазору  $Z_{2max}$  запам'ятовується. Розраховується величина зазору під датчиком  $C_2$ , при якій коловий зазор в опорі кочення 25 по осі  $\tilde{O}^A$  системи координат  $X^A O^A Y^A$  на фіксованому куті повороту однаковий

$$Z_{C2} = (Z_{2max} - Z_{2min}) / 2.$$

Вимикач 37 встановлюють в положення «вимк.» і відключають операційний підсилювач 34 від груп 9 і 11 силових магнітних відштовхувачів. За допомогою регулювальних гвинтів 21 силових магнітних відштовхувачів груп 9 і 11 відштовхувачів, змінюючи величини зазорів між магнітом вала 5 вала і магнітами 7 силових магнітних відштовхувачів, під датчиком  $C_2$  встановлюють величину зазору  $Z_{C2}$ .

З обчислювача подають сигнал керування  $U_{\tilde{\alpha} \delta.1}$ , який через пару операційних підсилювачів 30 і 31, перемикач «пряме–вимк.–зворотне» в положенні «пряме», диференційний підсилювач 33 надходить на групи 10 і 12 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі  $Y^A$  системи координат  $X^A O^A Y^A$ . Вал зміщують у напрямку півосі  $+Y^A$ . Величина зазору під датчиком величини зазору  $\tilde{N}_1$ , установленого по півосі  $+Y^A$ , зменшується. Сигнал керування  $U_1$  збільшують до величини, при якій величина зазору  $Z_1$  під датчиком  $C_1$  не зменшується, тобто зазор в опорі кочення 25 у перерізі по Ж – Ж опори в напрямку

півосі  $+Y^A$  повністю вибраний. Запам'ятовується величина зазору  $Z_{1min}$ . Перемикач 32 встановлюють у положення «зворотне» і змінюють полярність сигналу керування на диференційний підсилювач 33. Вал 2, 3, 4 опори буде зміщуватись в напрямку півосі  $-Y^A$ . Збільшують сигнал керування  $U_{\tilde{\alpha} \delta.1}$  до величини, при якій величина зазору під датчиком  $C_1$  не зростає, тобто зазор в опорі 25 кочення в напрямку півосі  $-Y^A$  буде вибраний. Величина зазору  $Z_{1max}$  запам'ятовується. Розраховується величина зазору під датчиком  $C_1$ , при якій коловий зазор в опорі кочення 25 по осі  $Y^A$  системи координат  $X^A O^A Y^A$  на фіксованому куті повороту однаковий

$$Z_{C1} = (Z_{1max} - Z_{1min}) / 2.$$

Вимикач 37 встановлюють у положення «вимк.» і відключають операційний підсилювач 33 від груп 10 і 12 силових магнітних відштовхувачів. За допомогою регулювальних гвинтів силових магнітних відштовхувачів груп 10 і 12 відштовхувачів, змінюючи величини зазорів між магнітом вала 5 вала і магнітами 7 силових магнітних відштовхувачів, під датчиком  $C_1$  встановлюють величину зазору  $Z_{C1}$ .

З обчислювача подають сигнал керування  $U_{\tilde{\alpha} \delta.3}$ , який через пару операційних підсилювачів 30 і 31, перемикач «пряме–вимк.–зворотне» в положенні «пряме», диференційний підсилювач 36 надходить на групи 13 і 15 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі  $\tilde{O}^A$  системи координат  $X^A O^A Y^A$ . Вал зміщують в напрямку півосі  $+\tilde{O}^A$ . Величина зазору під датчиком величини зазору  $\tilde{N}_4$ , установленого по півосі  $+\tilde{O}^A$ , зменшується. Сигнал керування  $U_{\tilde{\alpha} \delta.3}$  збільшують до величини, при якій величина зазору  $Z_4$  під датчиком  $C_4$  не зменшується, тобто зазор в опорі кочення 25 в перерізі по  $K - K$  опори в напрямку півосі  $+\tilde{O}^A$  повністю вибраний. Запам'ятовується величина зазору  $Z_{4min}$ . Перемикач 32 встановлюють у положення «зворотне» і змінюють полярність сигналу керування на диференційний підсилювач 36. Вал 2, 3, 4 опори буде зміщуватись в напрямку півосі  $-\tilde{O}^A$ . Збільшують сигнал керування  $U_{\tilde{\alpha} \delta.3}$  до величини, при якій величина зазору під датчиком  $C_4$  не зростає, тобто зазор в опорі 25 кочення в напрямку півосі  $-\tilde{O}^A$  буде вибраний. Величина зазору  $Z_{4max}$  запам'ятовується. Розраховується величина зазору під датчиком  $C_4$ , при якій коловий зазор в опорі кочення 25 по осі  $X^A$  системи координат  $X^A O^A Y^A$  на фіксованому куті повороту однаковий

$$Z_{C_4} = (Z_{4\max} - Z_{4\min}) / 2.$$

Вимикач 37 встановлюють в положення «вимк.» і відключають операційний підсилювач 36 від груп 14 і 16 силових магнітних відштовхувачів. За допомогою регулювальних гвинтів силових магнітних відштовхувачів груп 13 і 15 відштовхувачів, змінюючи величини зазорів між магнітом вала 5 вала і магнітами 7 силових магнітних відштовхувачів, під датчиком  $C_4$  встановлюють величину зазору  $Z_{C_4}$ .

З обчислювача подають сигнал керування  $U_{\alpha\delta.4}$ , який через пару операційних підсилювачів 30 і 31, перемикач «пряме–вимк.–зворотне» в положенні «пряме», диференційний підсилювач 35 надходить на групи 14 і 16 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі  $Y^A$  системи координат  $X^A O^A Y^A$ . Вал зміщують в напрямку півосі  $+Y^A$ . Величина зазору під датчиком величини зазору  $\tilde{N}_3$ , встановленого по півосі  $+Y^A$ , зменшується. Сигнал керування  $U_{\alpha\delta.4}$  збільшують до величини, при якій величина зазору  $Z_3$  під датчиком  $C_3$  не зменшується, тобто зазор в опорі кочення 25 в перерізі по  $K-K$  опори в напрямку півосі  $+Y^A$  повністю вибраний. Запам'ятовується величина зазору  $Z_{3\min}$ . Перемикач 32 встановлюють в положення «зворотне» і змінюють полярність сигналу керування на диференційний підсилювач 35. Вал 2, 3, 4 опори буде зміщуватись в напрямку півосі  $-Y^A$ . Збільшують сигнал керування  $U_{\alpha\delta.4}$  до величини, при якій величина зазору під датчиком  $C_3$  не зростає, тобто зазор в опорі 25 кочення в напрямку півосі  $-Y^A$  буде вибраний. Величина зазору  $Z_{3\max}$  запам'ятовується. Розраховується величина зазору під датчиком  $C_3$ , при якій коловий зазор в опорі кочення 25 по осі  $Y^A$  системи координат  $X^A O^A Y^A$  на фіксованому куті повороту однаковий

$$Z_{C_3} = (Z_{3\max} - Z_{3\min}) / 2.$$

Вимикач 37 встановлюють в положення «вимк.» і відключають операційний підсилювач 35 від груп 9 і 11 силових магнітних відштовхувачів. Регулювальними гвинтами силових магнітних відштовхувачів груп 14 і 16 відштовхувачів, змінюючи величини зазорів між магнітом вала 5 вала і магнітами 7 силових магнітних відштовхувачів, під датчиком  $C_3$  встановлюють величину зазору  $Z_{C_3}$ . У відповідності до алгоритму роботи підпрограми величини зазорів під датчиками 22  $C_1, C_2, C_3, C_4$  відображаються на екрані дисплея.

Розраховується жорсткість шпиндельної опо-

ри на постійних магнітах. Нехай після установки рівних величин зазорів під датчиками величин зазорів величини зазорів під магнітами відштовхувачів 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  $B_{\text{маг}}$  магнітів силових магнітних відштовхувачів, магнітну індукцію магнітів вала  $B_{\text{маг}}$ , площу полюсів  $S_M$  магнітів відштовхувачів і магнітів вала, магнітну постійну  $\mu_0$ , довжини  $l_i$ , величини зазорів  $l_C$  при яких будуть розраховуватись сили відштовхування. Вал опори навантажують в 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  $C_1$  і  $C_3$  встановлюють, наприклад, величини зазорів 110 мкм. Розраховуються сили відштовхування між силовим магнітним відштовхувачем і магнітом вала для зазорів 90 і 110 мкм за формулою

$$R = \frac{B_{\text{маг}}^2 \cdot S_M}{\mu_0 [1 + 2l_3 / \theta_0 l_{\text{маг.вад}}]^2} + \frac{B_{\text{маг}}^2 \cdot S_M}{\mu_0 [1 + 2l_3 / \theta_0 l_{\text{маг.вала}}]^2}, \quad (1)$$

де  $\theta_0$  – магнітна жорсткість.

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

$$R_{\text{маг.вад}} = R + 2R \sin \pi / 3. \quad (2)$$

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

$$\Delta R_1 = R_{90}^{+Y^A} - R_{110}^{-Y^A},$$

$$\Delta R_2 = R_{90}^{+Y^B} - R_{110}^{-Y^B}. \quad (3)$$

Обчислюється жорсткість радіальної шпиндельної опори на постійних магнітах

$$c = (\Delta R_1 + \Delta R_2) / 10. \quad (4)$$

Виконується пуск підпрограми обчислювача «Розрахунок критичних швидкостей обертання». У відповідності до алгоритму роботи підпрограми розраховуються критична кутова швидкості вала  $\omega_{\text{крит.маг}}$ .

У відповідності до рішення диференційних рівнянь закону руху вала суміщеної шпиндельної опори [5] величина зміщення осі обертання вала відносно геометричної осі обертання вала (рис.6) розраховується за формулою

$$r = \frac{e\omega^2}{k^2 - \omega^2}, \quad (5)$$

де  $k^2 = c/M$ ;

$M$  – маса вала суміщеної шпindelьної опори;

$\omega$  – кутова швидкість обертання вала;

$e$  – ексцентриситет.

Зміщення центра ваги  $C$  вала відносно геометричної осі обертання  $OC$  (див. рисунок 5) розраховується за формулою

$$OC = \frac{e k^2}{k^2 - \omega^2}; \quad (6)$$

При малій кутовій швидкості обертання вала, тобто при  $\omega < k$ , на основі формул (5) і (6) отримуємо  $|OC| > r > 0$ . При великій кутовій швидкості обертання диска 38, тобто при  $\omega > k$ ,  $r > |OC| > 0$ .

У міру збільшення кутової швидкості  $\omega$  вала відстань  $OC$  за модулем зменшується, тобто вал в пружному (магнітному полі силових магнітних підвісів) самостійно центрується (при  $\omega \rightarrow \infty |OC| \rightarrow 0$ ), і його центр ваги необмежено наближається до геометричної осі обертання.

Перепишемо формулу (6) у вигляді  $\frac{|OC|}{e} = \frac{k^2}{|k^2 - \omega^2|}$ . Якщо кутова швидкість вала опори значно більше його кругової частоти власних коливань, то  $|OC|/e$  – мала величина. У випадку  $\omega = k$  має місце явище резонансу і від-

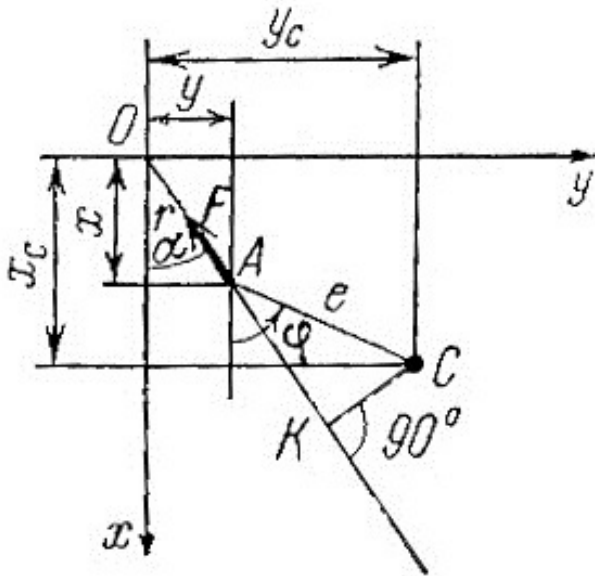


Рис.6. Положення геометричної осі обертання вала, зміщення осі обертання і центру ваги вала опори

стань  $OC$  необмежено зростає. У дійсності  $OC$  обмежена силами опору руху.

Резонансна кутова швидкість обертання вала опори, при якій його зміщення в магнітному полі досягає максимального значення, є критичною кутовою швидкістю обертання, а відповідне число обертів вала за хвилину – критичним числом обертів. Оскільки при резонансі  $\omega_{\text{ед}} = \hat{e}$ , а  $k = \sqrt{c/M_2}$ , то  $\omega_{\text{ед}} = \sqrt{\hat{n}/M_2}$ .

Отже,

$$n_{\text{кр.}} = \frac{30}{\pi} \omega_{\text{кр.}} = \frac{30}{\pi} \sqrt{c/M_2}. \quad (7)$$

Якщо в процесі балансування центр ваги вала переміщується на геометричну ось обертання, то навіть на кутових швидкостях обертання вала  $\omega_{\text{іа}}$  близьких до критичних величина зміщення геометричної осі обертання  $r \rightarrow 0$ , а вібрації корпусу шпindelьної опори на постійних магнітах не виникають. Балансування вала опори виконується шляхом вимірювання і усунення зміщення геометричної осі обертання вала у двох перерізах опори. Якщо вал суміщеної шпindelьної опори на постійних магнітах збалансований з високою точністю, геометрична ось обертання вала зберігає своє радіальне положення, вибране як незміщене, при визначеному радіальному навантаженні. Назвемо це радіальне навантаження запасом по радіальній стійкості відцентрованого вала суміщеної опори. При незміщеному положенні геометричної осі обертання вала суміщеної опори вона працює без навантаження опор кочення. Тому, якщо діапазон радіальних навантажень не перевищує межу запасу стійкості з центрування, вона працює без зміщення геометричної осі обертання вала, а отже, без навантаження опор кочення.

Вал шпindelьної опори встановлюється на кут повороту  $\varphi = 0$ . Виконується пуск підпрограми обчислювача «Вимірювання і оцінювання величин зазорів 1». У відповідності до алгоритму роботи підпрограми обчислювач  $N$  раз опитує вимірювачі величин зазорів за сигналами датчиків  $C_1, C_2$  і  $C_3, C_4$ . Обчислюються асимптотично незміщені оцінки  $\hat{Z}_1^{\varphi=0}, \hat{Z}_2^{\varphi=0}, \hat{Z}_3^{\varphi=0}, \hat{Z}_4^{\varphi=0}$  величин цих зазорів. Складовому валу 2, 3, 4 опори задається кутова швидкість обертання  $\omega_1$ , яка задовольняє умовам:  $\omega_1 < \omega_{\text{ед.ава}}$ . 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  $C_3, C_4$ . Обчислюються асимптотично незміщені оцінки  $\hat{Z}_1^{\varphi=0}, \hat{Z}_2^{\varphi=0}, \hat{Z}_3^{\varphi=0}, \hat{Z}_4^{\varphi=0}$  величин цих зазорів:

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

$$\hat{Z}_{3\omega_1}^{\varphi=0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_{3\omega_1}^{\varphi=0}(n); \quad \hat{Z}_{4\omega_1}^{\varphi=0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_{4\omega_1}^{\varphi=0}(n) \quad (8)$$

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  $X^B O^B Y^B$ » (рис.7).

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  $C_3, C_4$  на кутовій швидкості обертання  $\omega_1$  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  $X^B O^B Y^B$ :

$$\Delta X^A(\omega_1) = \hat{Z}_2^{\varphi=0} - \hat{Z}_{2\omega_1}^{\varphi=0}; \quad \Delta Y^A(\omega_1) = \hat{Z}_1^{\varphi=0} - \hat{Z}_{1\omega_1}^{\varphi=0};$$

$$\Delta X^B(\omega_1) = \hat{Z}_4^{\varphi=0} - \hat{Z}_{4\omega_1}^{\varphi=0}; \quad \Delta Y^B(\omega_1) = \hat{Z}_3^{\varphi=0} - \hat{Z}_{3\omega_1}^{\varphi=0};$$

$$r = \sqrt{(\Delta X^A(\omega_1))^2 + (\Delta Y^A(\omega_1))^2};$$

$$r_1 = \sqrt{(\Delta X^B(\omega_1))^2 + (\Delta Y^B(\omega_1))^2} \quad (9)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{\Delta Y^A}{\Delta X^A}; \quad \alpha_1 = \arcsin \frac{\Delta Y^B}{\Delta X^B}.$$

Методом послідовних наближень виконується балансування вала опори, наприклад, балансувальними вантажками. Послідовно виконується пуск підпрограми «Балансування». У відповідності до алгоритму роботи підпрограми на кожному кроці балансування на кутовій швидкості  $\omega_1$  обчислювач  $N$  раз опитує вимірювачі величин зазорів. Обчислюються оцінки  $\hat{Z}_{1\omega_1}^{\varphi=0}, \hat{Z}_{2\omega_1}^{\varphi=0}, \hat{Z}_{3\omega_1}^{\varphi=0}, \hat{Z}_{4\omega_1}^{\varphi=0}$  і різниці за нормою між оцінками величин

зазорів, які відповідають незміщеному положенню геометричної осі обертання вала і оцінками цих величин зазорів чергового кроку балансування на  $\omega_1$  кутовій швидкості  $\omega_1$ :

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

$$\| \cdot \| = \sqrt{(\hat{Z}_3^{\varphi=0} - \hat{Z}_{3\omega_1}^{\varphi=0})^2 + (\hat{Z}_4^{\varphi=0} - \hat{Z}_{4\omega_1}^{\varphi=0})^2}. \quad (10)$$

Домагаються мінімуму норм (10). У результаті на кутовій швидкості  $\omega_1$  геометрична ось обертання вала займатиме близьке до незміщеного положення або незміщене положення при рівності норм (10) нулю. Якщо норми (10) не рівні нулю на швидкості обертання  $\omega_1$  вала, підвищують швидкість обертання вала з кроком  $\Delta\omega$ . На черговому дискретному значенні кутової швидкості виконується пуск підпрограми «Балансування». Досягають рівності нулю норм (10). Вал сумі-

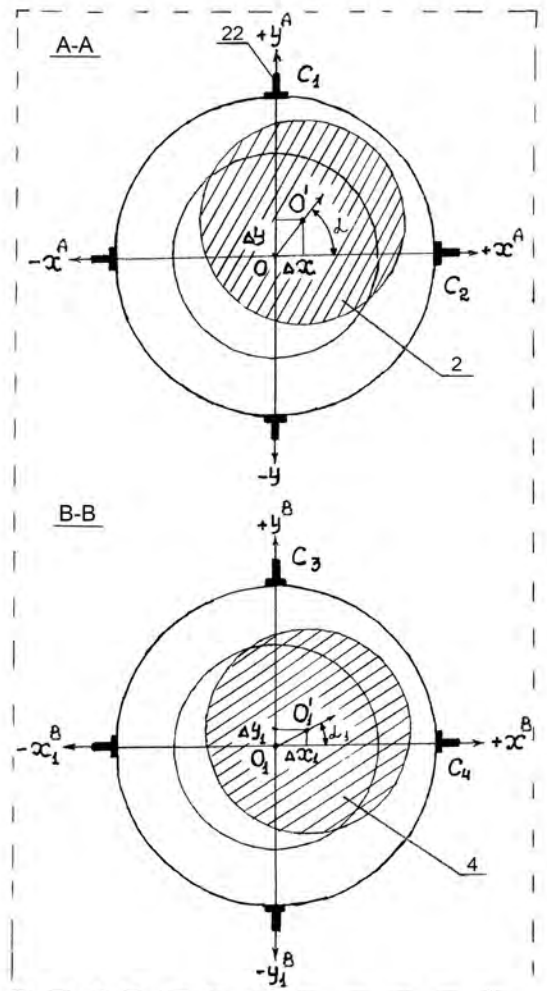


Рис.7. До визначення величини і напрямку зміщення осі обертання вала опори



щеної шпindelної опори буде збалансований з високою точністю, центр інерції складового вала 2, 3, 4 буде лежати на геометричній осі обертання вала опори. Обертання вала опори без зміщення здійснюватиметься навколо геометричної осі обертання.

Визначають запас радіальної стійкості вала суміщеної шпindelної опори (запас з самоцентрування). Виконують пуск підпрограми «Визначення запасу радіальної стійкості суміщеної шпindelної опори». При нерухомому валу 2, 3, 4 опори на фіксованому куті повороту послідовно навантажують вал силою  $P_1, P_2, P_3, \dots$  в напрямку півосей  $-Y^A$  і  $-Y^B$  систем координат  $X^A O^A Y^A$ ;  $X^A O^A Y^A$  і під датчиками 22  $C_1$  і  $C_3$  послідовно встановлюють величини зазорів 105, 110, 115, 120, 125 мкм (при початковій величині зазорів під цими датчиками і круговому зазорі в опорах кочення 50 мкм). Відповідно зазори між магнітами вала і магнітами силових магнітних відштовхувачів 12 і 16 будуть дорівнювати 95, 90, 85, 80, 75 мкм. На кожній з названих дискрет зміщення вала 2, 3, 4 опори подають сигнали керування  $U_{\alpha\delta.2}$  і  $U_{\alpha\delta.4}$  на групи 10, 12 і 14, 16 силових магнітних відштовхувачів і під датчиками  $C_1$  і  $C_3$  встановлюють початкові величини зазорів 100 мкм. Сигнали керування  $U_{\alpha\delta.2}(1), U_{\alpha\delta.2}(2), U_{\alpha\delta.2}(3), U_{\alpha\delta.2}(4), U_{\alpha\delta.2}(5)$  на групи 10 і 12 відштовхувачів, які викликають додаткову силу відштовхування для установки під датчиком  $\tilde{N}_1$  початкових величин зазорів (100 мкм), складають таблицю.

$\bar{P}(H)$	$\bar{P}_1/2$	$\bar{P}_2/2$	$\bar{P}_3/2$	$\bar{P}_4/2$	$\bar{P}_5/2$
$U_{\text{гнр.}}(B)$	$U_{\text{гнр.2}}(1)$	$U_{\text{гнр.2}}(2)$	$U_{\text{гнр.2}}(3)$	$U_{\text{гнр.2}}(4)$	$U_{\text{гнр.2}}(5)$

Будують функціональну залежність  $\bar{D}_{\alpha\delta.2}^{-Y^A} = f(U_{\alpha\delta.2})$  сили відштовхування в напрямку півосі  $+Y^A$  системи координат  $X^A O^A Y^A$  від сигналу керування  $U_{\alpha\delta.2}$ . Для цього зміст таблиці апроксимують ортогональним поліномом Чебишева:

$$P_{\text{відш.}}^{-Y^A} = a_1 U_{\text{гнр.2}}(1) + a_2 U_{\text{гнр.2}}^2 + a_3 U_{\text{гнр.2}}^3 + a_4 U_{\text{гнр.2}}^4 + a_5 U_{\text{гнр.2}}^5 \quad (11)$$

Збалансованому валу 2, 3, 4 суміщеної шпindelної

опори задають робочу кутову швидкість обертання  $\omega_{\alpha\delta.}$ . На кутах повороту вала  $\varphi_0$  на групи 10, 12 і 14, 16 силових магнітних відштовхувачів подають сигнали керування

$$U_{\text{гнр.2}}, U_{\text{гнр.4}}; U_{\text{гнр.2}} + \Delta U, U_{\text{гнр.4}} + \Delta U; \\ U_{\text{гнр.2}} + 2\Delta U, U_{\text{гнр.2}} + 2\Delta U; \dots$$

які збільшуються з дискретою  $\Delta U$ . На екрані дисплея спостерігають величину зазору під датчиком  $C_1$  після подачі кожної дискрети сигналів керування. Нехай зміщення збалансованого вала на «к» мкм вважається допустимим зміщенням вала суміщеної опори під дією радіального навантаження. Коли величина зазору під датчиком  $C_1$  досягне величини  $Z_{\text{нов.}} + \kappa$ , де  $Z_{i1}$  початкова величина зазору під датчиком  $C_1$ , при величині сигналу керування  $U_{\alpha\delta.2}$ , який відповідає зміщенню вала опори на «к» мкм, розраховується сила відштовхування, під дією якої збалансований вал опори був виведений з незміщеного положення, за ортогональним поліномом Чебишева. Тоді запас радіальної стійкості збалансованого вала суміщеної шпindelної опори дорівнює

$$2P_{\text{відш.}}^{-Y^A}(\kappa) = a_1 U_{\text{гнр.2}}(\kappa) + a_2 U_{\text{гнр.2}}^2(\kappa) + a_3 U_{\text{гнр.2}}^3(\kappa) + a_4 U_{\text{гнр.2}}^4(\kappa) + a_5 U_{\text{гнр.2}}^5(\kappa) \quad (12)$$

Це означає, що за умови, коли навантаження на вал суміщеної шпindelної опори на постійних магнітах не перевищує  $2\bar{D}_{\alpha\delta.2}^{-Y^A}$ , зміщення осі обертання вала опори за рахунок запасу радіальної стійкості збалансованого вала не перевищить «к» мкм.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Пат. 15383 Україна. Суміщена шпindelна опора; заявл. 05.07.1997.
2. Славинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты / А.Г. Славинская. – М.: Энергия, 1972.
3. Пятин Ю.М. Постоянные магниты, справочник / Ю.М. Пятин. – М.: Энергия, 1980.
4. Гриневич Б.Ф. Измерительные компенсационно-измерительные устройства с емкостными датчиками / Б.Ф. Гриневич. – К.: Наукова Думка, 1987.
5. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах / М.И. Бать. – М.: Наука, 1985.