

АЛГОРИТМ БАЛАНСУВАННЯ ВАЛА СУПЕРПРЕЦИЗІЙНОЇ АЕРОСТАТИЧНОЇ ШПИНДЕЛЬНОЇ ОПОРИ



В.О. Тарасов, докт. техн. наук,
Т.М. Назаренко,
Л.О. Злочевська

Постановка проблеми. Технологія балансування вала суперпрецизійної аеростатичної шпindelної опори має важливе значення в разі конструювання суперпрецизійних верстатів з інформаційним керуванням нового покоління. На основі теоретичних розрахунків доведено, що такі верстати зможуть гарантувати виготовлення виробів оптики й механіки приладо- і машинобудування з точністю не більше 0,03 мкм. Нині в галузі машинобудування, високих технологій і конверсій точність, що забезпечується прецизійними металорізальними верстатами, становить 10 – 0,1 мкм. Використання технології ковзання й точіння (шарикових і роликів підшипників), не вирішує цю проблему. Теоретичні опрацювання й можливі варіанти конструкцій пристроїв інформаційного керування суперпрецизійних верстатів [1; 2] відкривають нові можливості синтезу суперпрецизійних верстатів нового покоління. Це надасть можливість забезпечити точність обробки 0,1 – 0,01 мкм. Асоціація ділового й науково-технічного співробітництва в галузі машинобудування, високих технологій і конверсій на основі проведених аналітичних досліджень критичних технологій виявила, що Японія планує тільки в 2020 р. здійснити виготовлення суперпрецизійних верстатів такої точності [3].

Виклад основного матеріалу. Запропонована авторами технологія інформаційного керування потребує системного підходу до кожного вузла суперпрецизійного верстата з пристроями його інформаційного керування.

Поряд із системою керування для обчислення координат осі обертання вала аеростатичної опори необхідно не лише розраховувати й конструювати компенсатори радіального й осьового зміщення вала аеростатичної шпindelної опори, але й здійснювати його балансування.

У статті розглянемо питання балансування вала суперпрецизійної аеростатичної шпindelної опори, а спочатку – закон руху незбалансованого вала маси M у газовому шарі радіальної аеростатичної опори. Нехай вісь обертання вала проходить через початки базових систем координат XOY , суміщених із площинами установки датчиків величин зазорів (далі – геометрична вісь обертання вала). Центр маси C вала зміщений щодо геометричної осі обертання.

Початок O_1 системи координат $X_1O_1Y_1$ (рис. 1) помістимо в точку перетину площини Q центра маси із геометричною віссю обертання вала, вісь Z_1 сумістимо з геометричною віссю обертання, осі X_1 і Y_1 лежать у площині Q . У початковий момент часу валу надається кутова швидкість ω . Нехай A – точка перетину зміщеної осі обертання з площиною Q ; X_{1C} , Y_{1C} – координати центра маси вала; $O_1A = r$ – величина зміщення осі обертання; $AC = e$ – ексцентриситет. Рівняння радіального руху центра маси вала опори записуються в такому вигляді [4]:

$$\begin{aligned} M\ddot{X}_{1C} &= -qX_1; \\ M\ddot{Y}_{1C} &= -qY_1; \\ -I_c\ddot{\phi} &= qresin(\phi - a), \end{aligned} \quad (1)$$

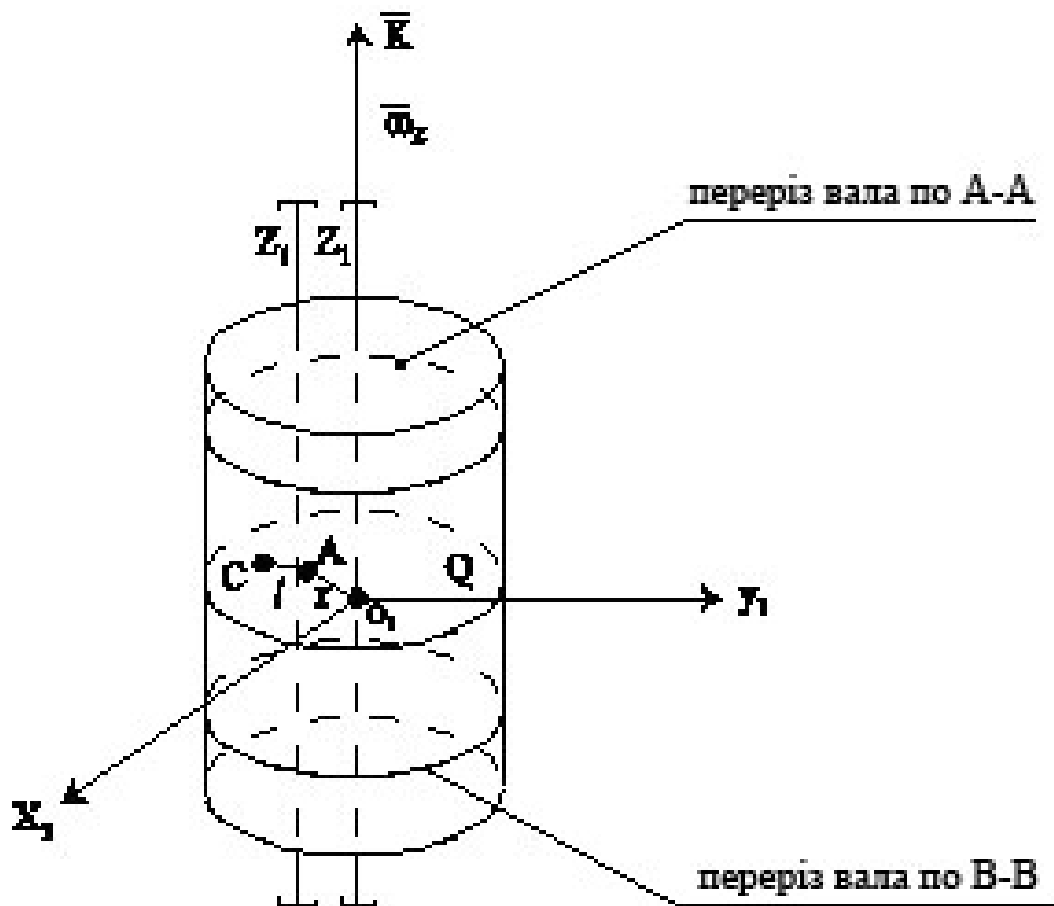


Рис. 1. Рух незбалансованого вала в газовому шарі радіальної аеростатичної опори

де a – кут між віссю X_1 і напрямком O_1A ;
 φ – кут між віссю X_1 і прямою AC , що проходить через центр маси вала.

Проінтегрувавши рівняння (1), отримаємо розрахунковий вираз для величини зміщення r осі обертання:

$$r = \frac{e\omega}{k^2 - \omega^2},$$

де $k^2 = q/M$.

Величина зміщення центра маси C від геометричної осі обертання:

$$O_1C = r + e = \frac{ek^2}{k^2 - \omega^2}.$$

За малої швидкості обертання ($\omega < k$) маємо $|O_1C| \geq r > 0$; у разі $\omega > k$ — $r \geq |O_1C| > 0$. У разі $|O_1C| \rightarrow 0$ центр ваги наближається до осі обертання, тобто вал самостійно центрується. У разі $\omega = 6k$, $|O_1C|/e = 0,029$. Отже, на компенсатори радіального зміщення

осі обертання вала діє додаткове навантаження: на швидкостях $\omega < k$ (до першої критичної швидкості) — динамічне навантаження від дисбалансу, на швидкостях $\omega > k$ (вище першої критичної швидкості) — перешкоджання самоцентруванню вала. У протилежному випадку вісь обертання вала буде зміщена відносно початків базових систем координат, тобто щодо обраного незміщеного положення.

Як відомо, рівняння для складових додаткових динамічних реакцій радіальних підшипників під час обертання твердого тіла навколо нерухомої осі мають вигляд [5]:

$$-MY_C\dot{\omega} - MX_C\omega^2 = X_A^D + Y_B^D;$$

$$MX_C\dot{\omega} - MY_C\omega^2 = Y_A^D + Y_B^D;$$

$$-I_{XZ}\dot{\omega} + I_{YZ}\omega^2 = -Z_A Y_A^D - Z_B X_B^D;$$

$$-I_{YZ}\dot{\omega} + I_{XZ}\omega^2 = Z_A X_A^D + Z_B X_B^D,$$

де M – маса вала;
 X_C, Y_C – координати центра маси вала;
 $\dot{\omega}, \omega$ – кутове прискорення й кутова швидкість вала;
 Z_A, Z_B – координати радіальних підшипників.

Для того щоб додаткові динамічні реакції підшипників дорівнювали нулю, тобто $X_A^d = X_B^d = Y_A^d = Y_B^d = 0$, має бути $X_C = Y_C = 0$, $I_{XZ} = I_{YZ} = 0$. Звідси, центр маси вала має перебувати на осі обертання, тобто вал опори повинен бути статично врівноваженим. Окрім того, відцентрові моменти інерції вала також мають дорівнювати нулю. Отже, щоб під час обертання вала навколо нерухомої осі не виникали додаткові динамічні реакції, необхідно й достатньо, щоб вісь обертання вала була головною центральною віссю інерції.

Балансування вала виконується пристроєм стабілізації радіального положення осі обертання вала суперпрецизійної аеростатичної шпіндельної опори по відхиленню осі обертання відносно обраного незміщеного положення під впливом динамічного навантаження. Перед початком балансування в пристрої стабілізації радіального положення осі обертання вала необхідно виконати такі установки:

- перемикачі 46 і 47 (рис. 2) *вкл.-викл.* установити в положення *викл.*, входи диференціальних підсилювачів 41-44 відключити від вимірювачів величин зазорів і виходів ЕОМ;
- перемикачі 45 *вкл.-викл.* установити в положення *вкл.*, входи диференціальних підсилювачів 41–44 підключити до груп регуляторів тиску компенсаторів радіального зміщення;
- перемикачі *більше-викл.-менше* встановити в положення *більше* або *менше*.

Таким чином, у незміщеному положенні вісь обертання вала проходить через початки систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$.

Вал опори встановлюється на кут повороту $\varphi_1 = 0$. Установлюються нульові значення сигналів керування: $U_{\text{упр.1}} = 0$; $U_{\text{упр.2}} = 0$; $U_{\text{упр.3}} = 0$;

$U_{\text{упр.4}} = 0$. Виконується пуск підпрограм: *установка вала 1*; *установка вала 2*; *установка вала 3*; *установка вала 4*. Послідовно виконується пуск підпрограм: *обчислення координат осі обертання вала 1*; *обчислення координат осі обертання вала 2*. У результаті обчислюються, оцінюються й відображаються на екрані дисплея такі координати осі обертання вала при повороті на кут $\varphi_1 = 0$:

$$\hat{X}^A(\varphi_1), \hat{Y}^A(\varphi_1) \text{ і } \hat{X}^B(\varphi_1), \hat{Y}^B(\varphi_1).$$

Якщо розраховані координати осі обертання відрізняються від координат незміщеного положення осі обертання вала, то, підбираючи сигнали керування $U_{\text{упр.1}} - U_{\text{упр.4}}$ і виконуючи пуски підпрограми *установка вала*, вісь обертання вала встановлюють у незміщене положення. Не змінюючи положення вала, виконують пуск підпрограми *масив сигналів керування*. Відповідно до алгоритму цієї підпрограми коди сигналів керування, що задають у статистиці на куті $\varphi_1 = 0$ повороту вала незміщене положення осі обертання, і код кута $\varphi_1 = 0$ повороту вала записуються в перші п'ять комірок масиву.

Вал опори послідовно встановлюється на кути повороту $\varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_j, \dots, 360^\circ - \Delta\varphi$. На кожній дискреті кута повороту формуються чергові п'ять комірок масиву сигналів керування:

$$\begin{aligned} & [U_{\text{упр.1}}(\varphi_1), U_{\text{упр.2}}(\varphi_1), U_{\text{упр.3}}(\varphi_1), U_{\text{упр.4}}(\varphi_1)] \\ & \dots \\ & [U_{\text{упр.1}}(\varphi_j), U_{\text{упр.2}}(\varphi_j), U_{\text{упр.3}}(\varphi_j), U_{\text{упр.4}}(\varphi_j)] \\ & \dots \\ & \left[U_{\text{упр.1}}(360^\circ - \Delta\varphi), U_{\text{упр.2}}(360^\circ - \Delta\varphi), \right. \\ & \left. U_{\text{упр.3}}(360^\circ - \Delta\varphi), U_{\text{упр.4}}(360^\circ - \Delta\varphi) \right]. \end{aligned}$$

Валу опори задають обертання з кутовою швидкістю $\omega < k$. Виконується пуск підпрограми *балансування*.

Алгоритм підпрограми включає в себе:

- порівняння поточного кута $\varphi(t)$ повороту з черговою дискретою φ_j кута повороту вала;

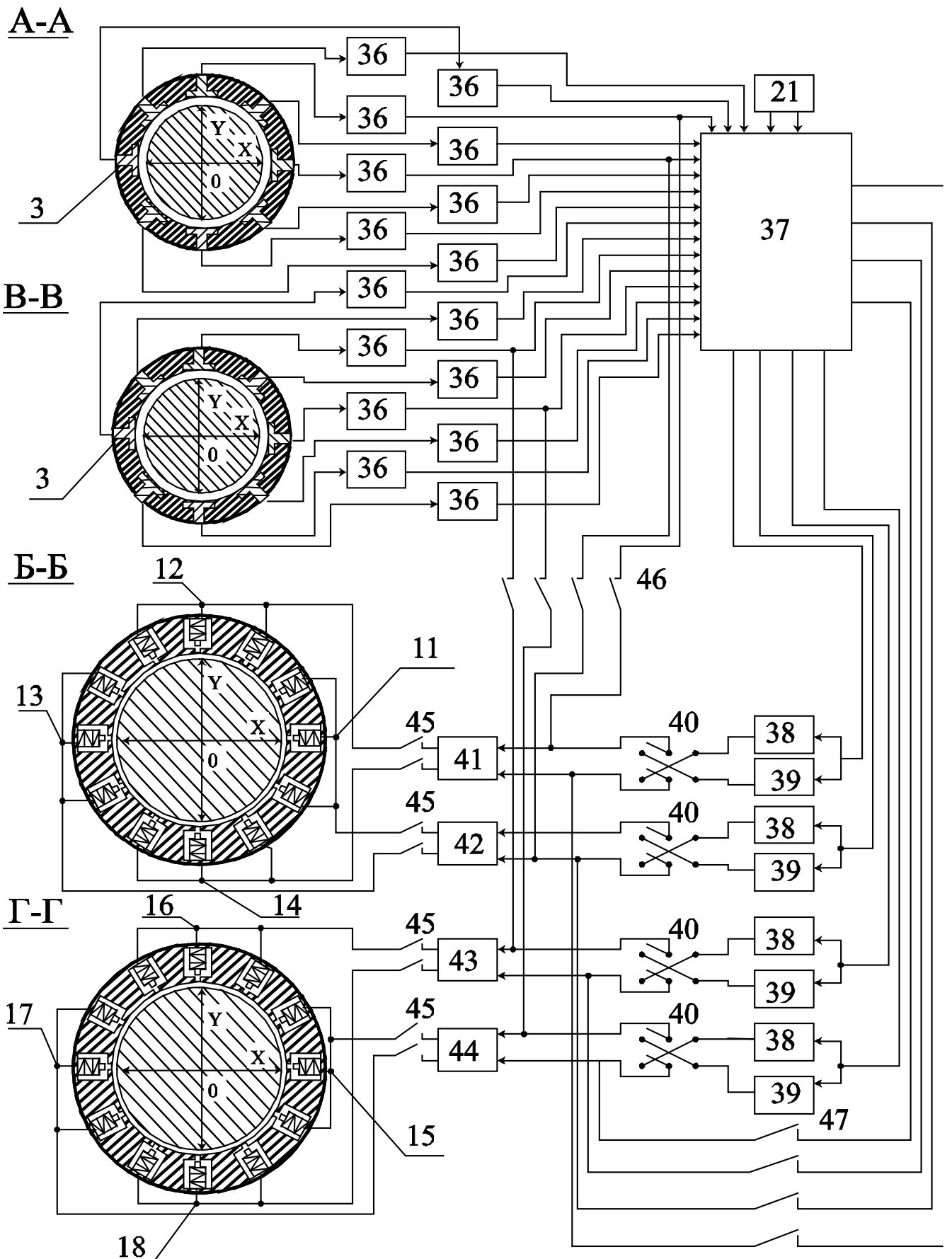


Рис. 2. Функціональна схема пристрою інформаційної стабілізації радіального положення осі обертання вала суперпрецизійної аеростатичної шпиндельної опори

- при виконанні $\varphi(t) = \varphi_j$ – зчитування сигналів керування $[U_{\text{ymp.1}}(\varphi_j), U_{\text{ymp.2}}(\varphi_j), U_{\text{ymp.3}}(\varphi_j), U_{\text{ymp.4}}(\varphi_j)]$ з масиву сигналів керування, перетворення їх у керуючі напруги й видача керуючих напруг на входи пар 38 і 39 операційних підсилювачів по ланцюгах: перемикачі 40, диференціальні підсилювачі 41–44, групи регуляторів тиску;

- опитування на заданому куті φ повороту вала, наприклад $\varphi = \varphi_1$ (рис. 3), вимірників величин зазорів, обчислення й оцінку координат осі обертання вала в площинах установки датчиків величин зазорів, відображення координат $\hat{X}^A(\varphi), \hat{Y}^A(\varphi)$ і $\hat{X}^B(\varphi), \hat{Y}^B(\varphi)$ на екрані дисплея, рівняння координат осі обертання $\hat{X}^A(\varphi), \hat{Y}^A(\varphi)$ і $\hat{X}^B(\varphi), \hat{Y}^B(\varphi)$ з координатами $\hat{X}^A = 0, \hat{Y}^A = 0$ і незміщеним положенням осі обертання.

При відхиленні вимірюваних координат осі обертання вала від координат її незміщеного положення розраховуються $\text{tg } \alpha_1 = \frac{\hat{Y}^A(\varphi)}{\hat{X}^A(\varphi)}$ і $\text{tg } \alpha_2 = \frac{\hat{Y}^B(\varphi)}{\hat{X}^B(\varphi)}$, а також кути $\alpha_1 = \text{arctg } \alpha_1$ і $\alpha_2 = \text{arctg } \alpha_2$ нахилу напрямку зміщення осі обертання до осей X^A і Y^A . Кути a_1 і a_2 від-

ображаються на екрані дисплея. Вал опори балансується відомим способом [6]. Повторно формується масив сигналів керування й визначаються кути a_1 і a_2 .

Методом послідовних наближень вал буде збалансований з похибкою, що не перевищує похибку виміру координат осі обертання вала. Якщо ця похибка $\delta \leq 0,01$ мкм, то величина r зміщення осі обертання під впливом динамічного навантаження також не перевищить 0,01 мкм. Із цього випливає, що вал статично й динамічно врівноважений з високою точністю, а його вісь обертання — головна центральна вісь інерції.

Розрахунки всіх вузлів суперпрецизійного верстата з пристроями інформаційного керування показали, що такі верстати нового покоління мають забезпечувати виготовлення виробів оптики й механіки приборо- і машинобудування з точністю не більше 0,03 мкм.

Висновки

Запропонована технологія започатковує прогресивний напрям у конструюванні принципово нових суперпрецизійних верстатів з пристроями інформаційного управління, які знайдуть широке застосування в машино- і приладобудуванні, а також у тих галузях промисловості, де потрібно виготовляти різноманітні вироби надвисокої точності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. 69126А Україна. Способ стабилизации радиального положения оси вращения вала аэростатической шпиндельной опоры / Тарасов В.А., Зиненко В.Н.; заявл. 08.12.2003; опубл. 16.08.2004, Бюл. № 8/2004.
2. Тарасов В.А. Технология устойчивости системы стабилизации радиального положения оси вращения вала суперпрецизионной аэростатической шпиндельной опоры / В.А. Тарасов, В.Н. Зиненко, Ю.И. Бурляй // Автоматизация производных процессов. – 2004. – № 2(19).
3. Денисов Ю.Д. Японские прогнозы мирового инновационного развития. – М.: ИДВ РАН, 2013. – 96 с.
4. Павловский М.А. Теория гироскопов. – К.: Вища шк., 1986. – 304 с.
5. Опоры скольжения с газовой смазкой / Под ред. С.А. Шейнберга. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 336 с.
6. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища шк., Головное изд-во, 1989. – 431 с.

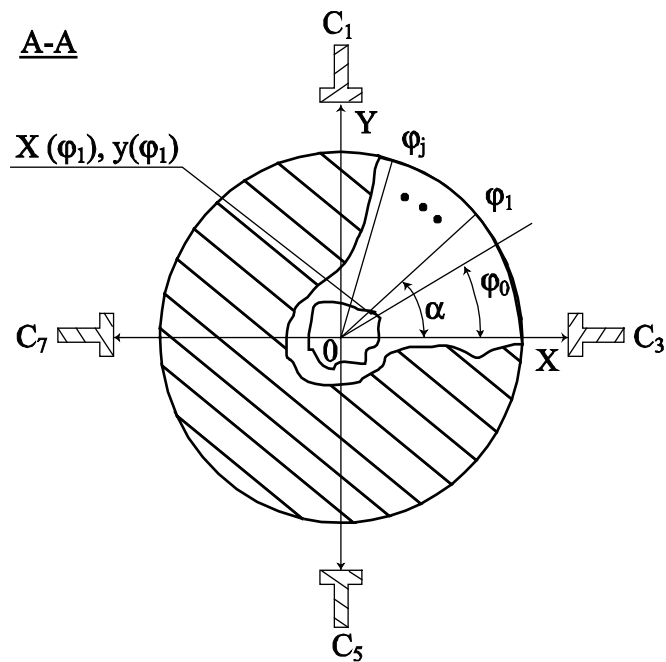


Рис. 3. Балансування вала суперпрецизійної аеростатичної шпиндельної опори