УДК 621.891 DOI: 10.18372/0370-2197.3(112).21587

О. В. БРЕШЕВ[1], П. Л. НОСКО[1], Г. О.БОЙКО[2], І. В. СЕМАК[1], А. О.БАШТА [3], О. В. ПОПОВ[1]

[1]Національний університет «Київський авіаційний інститут», Україна

[2]Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Україна

[3] Національний університет харчових технологій, Україна

МОДЕРНІЗАЦІЯ ОДНООПОРНОЇ СИСТЕМИ БЕЗКОНТАКТНОГО ПРИВОДУ

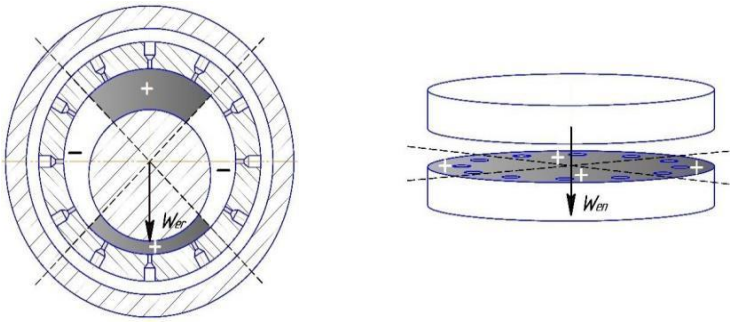
Під час модернізації приводів і машин, як правило, не вдається отримати значний позитивний ефект за всіма істотними для експлуатації напрямами. Модернізація одноопорної системи безконтактного приводу полягає у змінах конструкції, які покращують кілька характеристик і властивостей, тобто мають комплексний характер. Насамперед ідеться про зменшення обертових мас і маси всього приводу, підвищення жорсткості та вантажопідйомності опори й ротора, забезпечення стійкості обертання приводу на всіх швидкісних режимах і за будь-якого характеру зовнішніх навантажень, зниження експлуатаційних витрат (витрати технологічного повітря, електричної споживаної потужності тощо). На основі аналізу характеристик аеростатичних опор запропоновано напрями та реалізовано модернізацію одноопорної аеростатичної системи приводу. Її суть полягає в переході від симетричної здвоєної конічної конструкції до несиметричної конічно-кільцевої конструкції, в якій кільцева опорна поверхня, як підп'ятник, сприймає основне навантаження.

Ключові слова: *безконтактний одноопорний привод, модернізація одноопорної системи, симетрична здвоєна конічна конструкція, несиметрична конічно-кільцева конструкція, покращення характеристик, вага ротора, витрата повітря, тиск наддуву, жорсткість опори.*

Вступ. Ідея модернізації одноопорної системи безконтактного приводу полягає в підвищенні ефективності радіально-упорного підшипника, яку якісно можна описати таким чином. У не модернізованому варіанті основне навантаження сприймається в радіальному напрямку, тому аеростатична опора, головним чином, працює як радіальна опора. Принцип дії радіальної аеростатичної опори характеризується наявністю чотирьох областей опорних поверхонь, дві з яких сприймають 90-95% навантаження, а дві інші області мають допоміжне значення. На рис. 1 знаком "+" показано області, що створюють підйомну радіальну силу W_{er} або відновлювальну пружну силу (*ВПС*), знаком "-" - ділянки опори, які практично не створюють *ВПС*. Таким чином, у радіальній опорі *ВПС* формують приблизно 50% опорної поверхні, що показано на рис. 1, а. У разі якщо основне технологічне навантаження має напрямок не радіальний, а осьовий, раціональніше використовувати опору типу "підп'ятник", у якій уся опорна поверхня бере участь у формуванні підйомної сили W_{en} (рис.1,б).

Навантаження сприймається всією опорною поверхнею підп'ятника, а розподілення тиску в зазорі має центральну вісь симетрії, кожний сектор $2\pi/N$

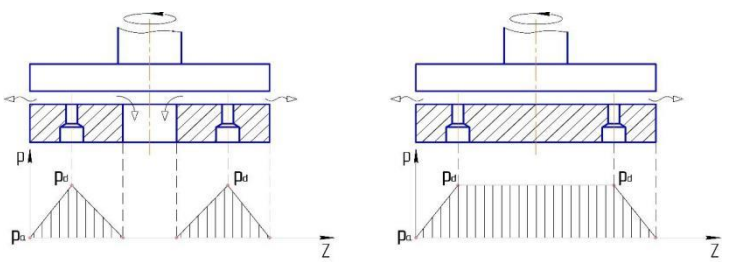
вносить однакову частку в несучу здатність підп'ятника. За рахунок цього підвищується питома вантажопідйомність і ефективність таких опор.



а б

Рис. 1. Розподіл областей, що формують ВПС у радіальному підшипнику (а) і підп'ятнику (б)

Існують два основні типи підп'ятників: кільцеві та кругові [1-3], назва яких відповідає геометричній формі опорних поверхонь. У кільцевого підп'ятника, порівняно з круговим, менша робоча площа опорної поверхні і збільшена лінія дренажу за рахунок центрального отвору. Призначення центрального отвору полягає в розміщенні елементів конструкції приводу, інструменту (наприклад, алмазного відрізного круга з внутрішньою ріжучою кромкою) і забезпеченні необхідних умов для технологічного процесу. Збільшення лінії дренажу газового мастила призводить до підвищення витрати технологічного повітря Q і зменшення підйомної сили $W_{еп}$ при цьому ж Q. Ефективність кругового підп'ятника за несучою здатністю, як порівняти з кільцевим, визначається відмінністю в розподілі тиску газового мастила в їхніх зазорах через дренаж по внутрішньому кільцю (рис. 2).



а б

Рис. 2. Конструкція і приблизний розподіл тиску газового мастила p у кільцевому (а) і круговому (б) підп'ятниках:
p_a - зовнішній (атмосферний) тиск; p_d - тиск на виході з живильника

Таким чином, ми на якісному рівні показали переваги у створенні несучої здатності підп'ятника перед радіальним підшипником і кругового підп'ятника перед кільцевим. Ідея модернізації одноопорної системи шпиндельного вузла полягає у використанні цих технічних переваг.

Виклад основного матеріалу

Виходячи з наведених вище міркувань (див. Рис. 1, 2), для підвищення

несучої здатності та зменшення витрати технологічного повітря безконтактного приводу пропонується модернізована конструкція аеростатичної опори [4-7]. Вона структурно складається з двох частин: радіальної (з конічною опорною поверхнею) і упорної (на кшталт кільцевого підп'ятника), кожна з яких має тільки зовнішню лінію дренажу, а з боку центрального отвору зазор сполучається з недренажованою кільцевою порожниною відносно малого об'єму. У розглянутого безконтактного приводу ротор має форму широкого кільця, тому переведення його в горизонтальне положення перетворює радіальну опору (під основне вертикальне й радіальне для опори навантаження) на кільцевий підп'ятник також з основним вертикальним навантаженням, але вже спрямованим уздовж осі обертання підшипника (рис. 3).

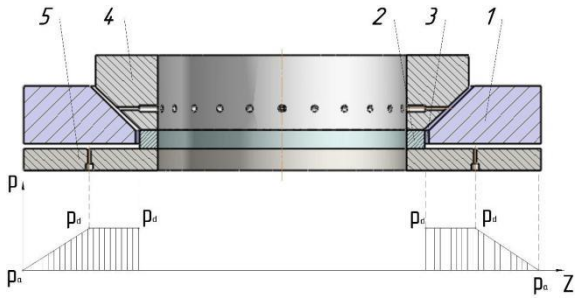


Рис. 3. Конструктивна схема модернізованої одноопорної системи з розподілом тиску мастила на упорній частині

1 - рухома опорна частина приводу; 2 — кільце; 3 - кільцевий об'єм, що з'єднує частини опори; 4 - нерухома частина аеростатичної опори з конусною поверхнею; 5 - нерухома частина аеростатичної опори з кільцевою опорною поверхнею.

Максимальне навантаження спрямовується на ту частину опори, яка аналогічна за конструкцією підп'ятника. Для стабілізації просторового положення ротора його опорна частина 1 має дві опорні поверхні. Перша - горизонтальна, яка спирається через газове мастило на підп'ятник 5 і сприймає осьове навантаження, що забезпечує стабілізацію в осьовому напрямку.

Друга опорна поверхня розташована під кутом до осі обертання і має форму конуса. Вона, по-перше, слугує для фіксації рухомої опорної частини 1 у радіальному напрямку та сприйняття радіального технологічного навантаження, що діє на ротор. По-друге, "підтискає" опорну частину 1 до підп'ятника, обмежуючи його хід в осьовому напрямку догори, тому що реакція газового мастила на конусній поверхні має й осьову складову. Газове мастило з внутрішньої сторони не дренажується, а потрапляє в замкнений кільцевий об'єм 3 з тиском близьким до p_d, який герметизується спеціальним кільцем 2. За рахунок цього газове мастило по внутрішньому кільцю не дренажується, з цієї причини кільцева частина опори за своїми характеристиками наближається до кругового підп'ятника.

Це кільце виконує три функції:

- з'єднання нерухомих частин 4 і 5 опори;
- герметизація об'єму 3;
- встановлення та регулювання зазорів із газовим мастилом.

Таким чином, якщо не брати до уваги внутрішній виріз, то наближений характер розподілу тиску в зазорі кільцевого підп'ятника, представленого на рис. 3, відповідає розподілу в круговому підп'ятнику (див. рис. 2, б). На підставі цього,

для визначення статичних характеристик цієї частини опори використовується методика для розрахунку кругових підп'ятників [3], але з урахуванням величини (площі) опорної поверхні. Тривимірна модель модернізованої одноопорної системи безконтактного приводу (шпиндельного вузла верстата різання монокристалів) показана в розрізі на рис. 4.

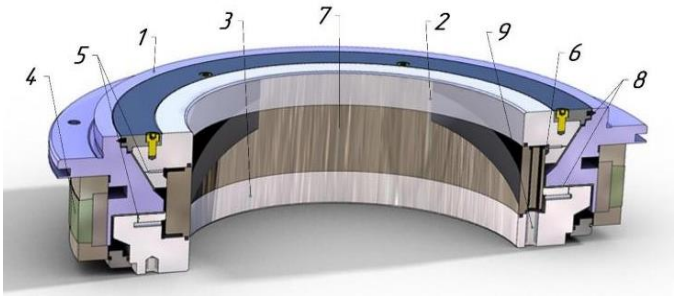


Рис. 4. Тривимірна модель модернізованої одноопорної системи:
1 - рухома опорна частина приводу; 2 - нерухома радіальна (конусна) опорна частина; 3 - нерухома опорна частина типу підп'ятник; 4 - система магнітів для приведення рухомої частини в обертання; 5 - обмежувачі витрати повітряного мастила (живильники); 6 - проміжна кільцева камера; 7 - з'єднувальне кільце; 8 - зазор із повітряним мастилом; 9 - впускний канал для подачі повітряного змащення.

У даній конструкції з'єднувальне кільце 7 запобігає дренажу повітряного мастила між зазорами частин опори і відповідає кільцю 2 на рис. 3. Це дає змогу частину одноопорної системи з кільцевою опорною поверхнею розглядати як круговий підп'ятник. У зіставленні одноопорний шпиндельний вузол верстата різання монокристалів до і після модернізації показано на рис.5.

Метою подальших досліджень і розрахунків основних параметрів і характеристик одноопорного приводу є підтвердження того, що модернізована опорна система, показана на рис 4,5, за умови збереження вантажопідйомності на рівні не модернізованої, буде володіти більшою жорсткістю і забезпечить значне зменшення витрати повітря.

На рис. 6 представлена розрахункова схема для визначення параметрів і характеристик упорної частини модернізованої одноопорної системи шпиндельного вузла верстата різання монокристалів. Вона виконана за аналогією зі схемою для розрахунку радіальної опори вихідної конструкції [4]. У цьому разі проведено заміну конусних опорних поверхонь на еквівалентні за навантажувальною осьовою здатністю кільцеві.

Таким чином, одноопорна система має конічну частину, що сприймає, головним чином, радіальні навантаження, і кільцеву (підп'ятник) - для осьових навантажень. Розрахунок і дослідження конічної частини опори виконується ідентично до немодернізованої системи [8-11]. Розрахунок же підп'ятника одноопорної системи базується на спрощеному рівнянні Рейнольдса (Λ=0; σ=0; H=1):

$$\frac{d}{d\underline{r}}\left(\underline{r}\frac{dP}{d\underline{r}}\right) = 0, \qquad (1)$$

де $\underline{r}$ – безрозмірна радіальна координата, отримана відношенням поточної координати r до зовнішнього радіуса підп'ятника $R_{пн}$.

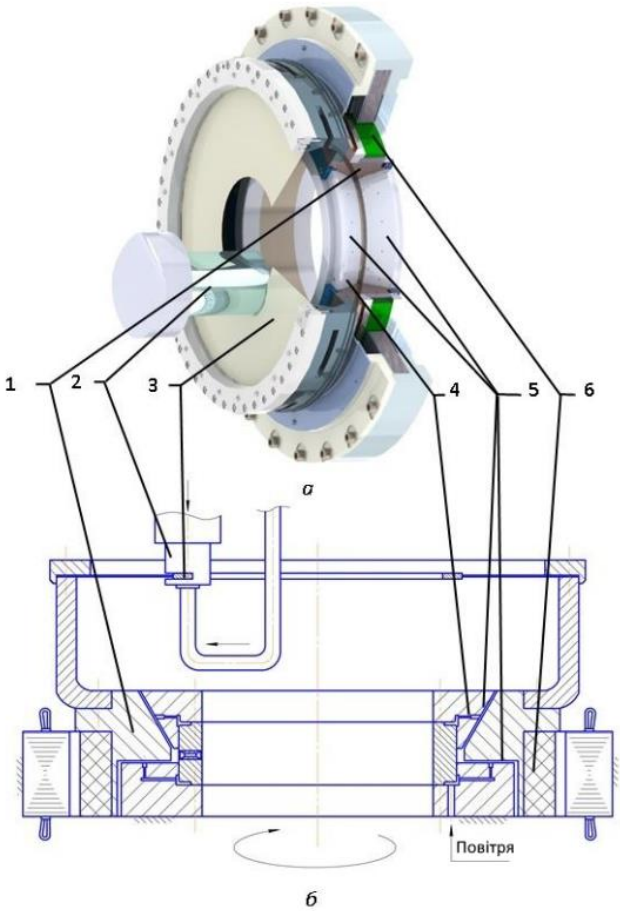


Рис. 5. Одноопорний безконтактний привід шпинделя верстата різання до (а) і після (б) модернізації:
1 - рухома частина аеростатичної опори; 2 - монокристал, що розрізається (робоче тіло); 3 - РО (алмазний круг із внутрішньою ріжучою кромкою); 4 - обмежувачі витрати повітряного змащення або живильники; 5 - несучі поверхні аеростатичної опори; 6 - вторинний елемент рухової установки (рушія) приводу.

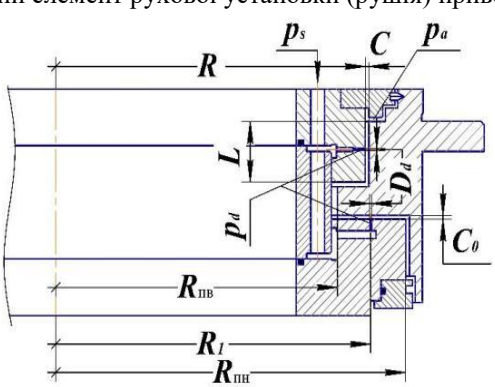


Рис.6. Розрахункова схема модернізованої одноопорної системи

Рівняння (1) інтегрується за таких граничних умов:

- розподіл тиску є безперервною та періодичною функцією;
- при $\underline{r} = r_1$ $P^- = P^+ = \underline{p}_d^2$, а при $\underline{r} = 1$, $P^+ = \underline{p}_a^2$,

де $r_1 = \frac{\sqrt{R_{\text{пн}}{}^2 - R_{\text{пв}}{}^2}}{R_1}$ – відносний радіус наддуву;

«–» и «+» – підобласті $0 \le \underline{r} <$r1, r1 $\le \underline{r} < 1$, на які область інтегрування $0 \le \underline{r} <1$ розбивається лінією наддуву $\underline{r} = r_1$;

$\underline{p}_d^2$ – квадрат відносного протитиску, що визначається з балансу витрат мастила на межі областей:

$$\frac{dP^-}{d\underline{r}} - \frac{dP^+}{d\underline{r}} = \frac{\underline{m}}{r_1}\vartheta\left(\underline{p}_d\right);$$

$$\frac{\underline{p}_d^2 - \underline{p}_a^2}{\vartheta\left(\underline{p}_d\right)} = \underline{m}|lnr_1|.$$

Під час розрахунку підп'ятника використовують такі вихідні дані: вид газового мастила - повітря, яке характеризується параметрами: k – показник адіабати; μ - динамична в'язкость повітря; ρ – густина газового мастила; a - швидкість звуку , що має характерні тиски подачи p_s та p_a. .Основні геометричні та конструктивні параметри: $R_{\text{пн}}$ –зовнішній радіус, $R_{\text{пв}}$ – внутрішній радіус, R_1 – радіус лінії наддуву, C_0 – величина зазору, N – число живильників, їх діаметр – D_d. Як і для радіального підвісу, визначаються параметри $\underline{m}$ (параметр режиму аеростатичної опори) та $\underline{p}_d$ по формулам [9,12] відповідно. Для розрахунку вантажопідйомності упорної частини (підп'ятника) модернізованої опори використовуємо співвідношення:

$$W_{\text{п}} = \pi\left(R_{\text{пн}}{}^2 - R_{\text{пв}}{}^2\right)p_s \cdot \overline{W}_{\text{п}} = \\ = \pi\left(R_{\text{пн}}{}^2 - R_{\text{пв}}{}^2\right)p_s \cdot \frac{1}{c}\, e^{(\upsilon_1)^2}\left(\int_0^{\upsilon} e^{-(\upsilon)^2}d\upsilon - \int_0^{\upsilon_1} e^{-(\upsilon_1)^2}d\upsilon_1\right), \quad (2)$$

де $\upsilon = c\underline{p}_d$; $\upsilon_1 = c\underline{p}_a$; $c = \sqrt{\frac{2|lnr_1|}{\underline{p}_d^2 - \underline{p}_a^2}}$.

Розмірна осьова жорсткість упорної частини:

$$K_\varepsilon = \frac{\pi\left(R_{\text{пн}}^2 - R_{\text{пв}}^2\right)p_s}{C_0} \cdot \overline{K}_\varepsilon = \frac{2\pi\left(R_{\text{пн}}^2 - R_{\text{пв}}^2\right)p_s}{C_0} \cdot \\ \cdot \frac{\overline{p}_d\left(1 - 2c^2\,\overline{p}_a{}^2\right)\overline{W}_{\text{п}} + \overline{p}_d \cdot \overline{p}_a - \overline{p}_a{}^2 \cdot r_1^2}{2\overline{p}_d + \overline{m}\left|\ln r_1\right| \cdot \left|\vartheta'\left(\overline{p}_d\right)\right|}, \quad (3)$$

де $\left|\vartheta'\left(\underline{p}_d\right)\right| = \{0$ при $\underline{p}_d \le 0.5$ – похідна модуля функції закінчення.

Підйомні сили підп'ятника і радіальної (конусної) частини опори спрямовані назустріч під кутом π/2+α і частково врівноважуються. Вони є інтегральними характеристиками. У загальному вигляді їх можна представити як суму елементарних сил тиску мастила, що діють на елементарні майданчики опорних поверхонь.

На рис.7 показано схему фрагмента опори з елементарними майданчиками конічної (нижній індекс – «г») і кільцевий (нижній індекс – «п») опорних поверхонь ротора, на які діють елементарні сили, зумовлені тиском мастила.

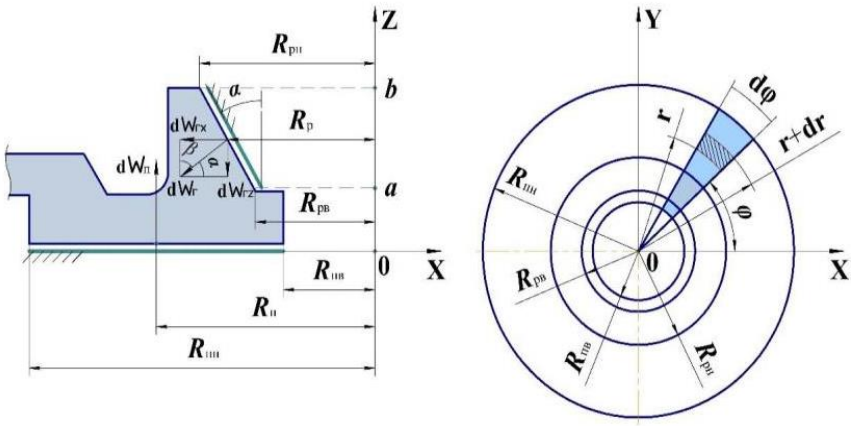


Рис.7. Схема розрахунку вантажопідйомності модернізованої опори

Тоді елементарні сили та їхні складові можна представити у вигляді:

$$dW_{\text{п}} = p_{\text{п}}(r,\phi)\, r dr d\phi;$$
$$dW_r = p_r(r,\phi,z)\, dS_r;$$
$$dW_{r\text{x}} = p_r(r,\phi,z) dS_r cos\alpha;$$
$$dW_{rz} = p_r(r,\phi,z)\, dS_r sin\alpha\ = p_r(r,\phi,z)\, dS_r cos\beta \qquad (4)$$

або

$$dW_{rz} = p_r(r,\phi,z)\, r\, dr d\phi,$$

де $p_{\text{п}}(r,\phi)$ и $p_r(r,\phi,z)$ – функції розподілу тиску газового мастила за зазорами в наполегливій і радіальній частинах опори відповідно; dS_r – елементарна площадка по конусній поверхні опори.

Отже, у загальному випадку, підйомна сила модернізованої одноопорної системи визначається виразом:

$$W_Z = W_{\text{п}} - W_{rz} = \int_0^{2\pi}\int_{R_{\text{пв}}}^{R_{\text{пн}}} p_{\text{п}}(\phi,r)\, r d\phi\, dr - \int_0^{2\pi}\int_{R_{\text{рв}}}^{R_{\text{рн}}} p_r(r,\phi,z)\, r\, d\phi dr. \qquad (5)$$

Якщо використовувати для розрахунку наближений характер розподілу тиску газового мастила, показаний на рис. 3, то підйомна сила підп'ятника або наполегливої частини опори визначається:

$$W_{\text{П}} = \pi(R_{\text{П}}^2 - R_{\text{ПВ}}^2)p_d + \frac{1}{2}(R_{\text{ПН}}^2 - R_{\text{П}}^2)p_d = \pi p_d \left[(R_{\text{П}}^2 - R_{\text{ПВ}}^2) + \frac{(R_{\text{ПН}}^2 - R_{\text{П}}^2)}{2}\right]. \quad (6)$$

Аналогічним чином можна отримати вираз для визначення осьової складової підйомної сили W_{rz} конічної частини опори. З огляду на те, що тиск подачі газового мастила p_s для всієї опори, як правило, однакове і пов'язане з протитиском співвідношенням $p_d \approx (0{,}55\ldots0{,}85)\ p_s$, отримуємо формулу для наближеного розрахунку вантажопідйомності одноопорної системи:

$$W_Z = 0{,}7\pi p_d \left(\left[(R_{\text{П}}^2 - R_{\text{ПВ}}^2) + \frac{(R_{\text{ПН}}^2 - R_{\text{П}}^2)}{2}\right] - \left[(R_{\text{Р}}^2 - R_{\text{РВ}}^2) + \frac{(R_{\text{РН}}^2 - R_{\text{Р}}^2)}{2}\right]\right). \quad (7)$$

Визначення умов працездатності одноопорної системи.

Тепер розглянемо укрупнено фрагмент опори з умовним перетином показаних зазорів із газовим мастилом для трьох положень ротора:

- розрахунковому не навантаженому (нульові ексцентриситети) із середніми зазорами C та C_0, коли реакції частин опори дорівнюють 0;
- у вихідному положенні, коли на опорні поверхні ротора діють реакції газового мастила, зумовлені початковими ексцентриситетами $e_{0г}$ та $e_{0п}$, з зазорами $h_{0г}$ та $h_{0п}$, встановлюваними під час складання приводу, а сили реакції частково врівноважуються;
- у положенні під дією вертикального навантаження, що призводить до виникнення ексцентриситетів $e_г$ та $e_п$ з зазорами $h_г$ и $h_п$ (рис.8).

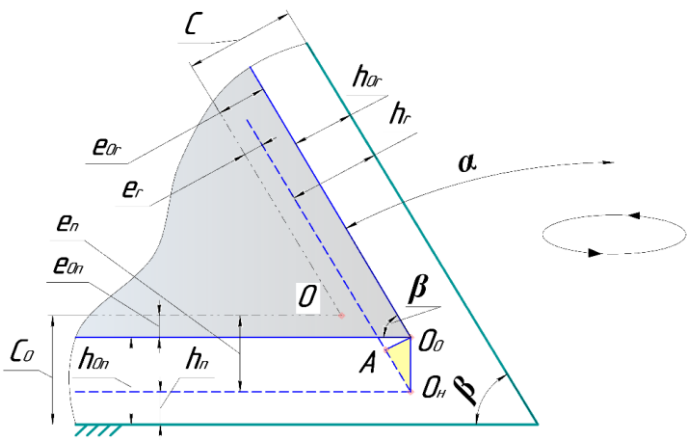


Рис. 8. Характерні положення рухомої опорної частини відносно нерухомої та відповідні їм зазори з газовим мастилом

Основне осьове навантаження (від 70% до 95% якого становить вага ротора шпиндельного вузла) сприйматиме горизонтальна кільцева опорна поверхня. Додаткову стабілізацію в осьовому напрямку (за рахунок деякого стабілізуючого навантаження на холостому ходу) і стійкість у радіальному напрямку забезпечує

кінцева опорна поверхня радіальної частини аеростатичної опори. Покажемо, що для надійного функціонування опори необхідне встановлення її зазорів h0r та $h_{0п}$ з деякими ексцентриситетами e_{0r} та $e_{0п}$, що створює вихідний підпір ротора (часто вживають термін "преднатяг") у робочому положенні, але без навантаження, що можна назвати роботою на холостому ходу. Якщо положення вершини О на кромці ротора відповідає середнім зазорам С та C_0, то перехід її в положення O_0 здійснюється під час складання і призводить до виникнення ексцентриситетів вихідного положення e_{0r} та $e_{0п}$. Під вертикальним навантаженням вершина займе положення O_H з ексцентриситетами e_r та $e_п$. При цьому, відповідно до рис.7, геометричні параметри опорної системи співвідносяться таким чином:

$$e_{0r} > e_r, \quad \text{а} \quad e_{0п} < e_п;$$

$$h_{0r} < h_r, \quad \text{а} \quad h_{0п} > h_п;$$

$$h_{0r} - h_r = (h_п - h_{0п}) \cdot sin\alpha = (h_п - h_{0п}) \cdot cos\beta < 0; \qquad h_{0_п} - h_п > 0. \tag{8}$$

Наведені вище співвідношення показують, що під час дії навантаження підп'ятник навантажується, а радіальна або конічна частина опори розвантажується. Тому без "переднатягу", коли початкове положення має нульові ексцентриситети за середніх зазорів С та C_0 навантаження опори призведе до втрати працездатності радіальної (конічної) частини опори.

На цій підставі умова працездатності одноопорної системи під час дії максимально допустимого вертикального навантаження W_e^z, яка врівноважується головним вектором сил тиску змащення W_Z, необхідно розглядати як одночасне виконання двох умов - збереження мінімального допустимого зазору на підп'ятнику і мінімального відносного ексцентриситету ($\varepsilon_{0r} \approx 0{,}1$) на радіальній частині опори. Враховуючи, що осьова жорсткість підп'ятника:

$$K_z^{\varepsilon} = \frac{2\pi(R_{пн}^2 - R_{пв}^2)p_s}{C_0} \frac{\underline{p}_d \left(1 - 2c^2\, \underline{p}_{a^2}\right) \underline{W}_п + \underline{p}_d\, \underline{p}_a - \underline{p}_{a^2} r_{1^2}}{2\underline{p}_d + \underline{m}\,|lnr_1|\, \left|\vartheta'\left(\underline{p}_d\right)\right|} \tag{9}$$

Та з урахуванням (8) та рис.7, умова працездатності модернізованої одноопорної системи набуває вигляду:

$$W_z \cdot \frac{C_0}{2\pi(R_{пн}^2 - R_{пв}^2)p_s} \cdot \frac{2\underline{p}_d + \underline{m}\,|lnr_1| \cdot \left|\vartheta'\left(\underline{p}_d\right)\right|}{\underline{p}_d \left(1 - 2c^2\, \underline{p}_{a^2}\right) \underline{W}_п + \underline{p}_d \cdot \underline{p}_a - \underline{p}_{a^2} \cdot r_{1^2}} \leq 0.8C_0;\ W_z \cdot \frac{C_0}{2\pi(R_{пн}^2 - R_{пв}^2)p_s} \cdot \frac{2\underline{p}_d + \underline{m}\,|lnr_1| \cdot \left|\vartheta'\left(\underline{p}_d\right)\right|}{\underline{p}_d \left(1 - 2c^2\, \underline{p}_{a^2}\right) \underline{W}_п + \underline{p}_d \cdot \underline{p}_a - \underline{p}_{a^2} \cdot r_{1^2}} \cdot sin\alpha < 0.9e_{0r}. \tag{10}$$

Обговорення результатів.

Аналіз і оцінка техніко-економічного ефекту модернізації.

Розрахунок основних параметрів одноопорної системи для вантажопідйомностей у діапазоні від 1200 Н до 5500 Н, за варіювання низки параметрів аеростатичної опори (N, p_a, p_s, C, D_{nd}), показав технічні переваги модернізованої одноопорної системи перед її вихідною конструкцією.

Порівняльний аналіз засвідчив, що при збереженні достатньої вантажопідйомності та жорсткості, модернізована система має легший ротор, потребує значно меншої витрати технологічного повітря на опору і має більшу жорсткість.

Результати розрахунків модернізованої одноопорної системи безконтактного приводу і відсоткове порівняння її характеристик з вихідною конструкцією одноопорної системи (див. рис. 9) за умови однакової їхньої вантажопідйомності 2700 Н та однієї величини середнього зазору з повітряним змащенням - 15 мкм наведено в таблиці 1.

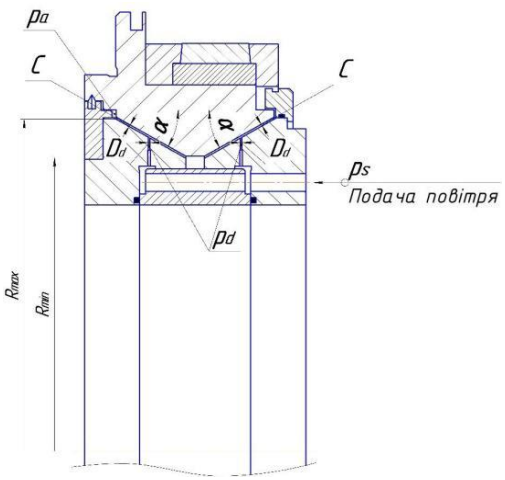


Рис. 9. Одноопорна система на аеростатичному підшипнику

Таблиця 1

Результати модернізації одноопорної системи шпиндельного вузла

Параметр	Значення	Порівняння з вихідною системою, %
Вага ротора	81 (кг)	– 8
Витрата повітря	1,7 (м3/ч)	– 37
Тиск наддуву	0,56 (МПа)	– 18
Жорсткість	376 (Н/мкм)	+ 16

Висновки. На основі аналізу характеристик аеростатичних опор запропоновано напрями та реалізовано модернізацію одноопорної аеростатичної системи приводу. Її суть полягає в переході від симетричної здвоєної конічної конструкції до несиметричної конічно-кільцевої конструкції, в якій кільцева опорна поверхня, як підп'ятник, сприймає основне навантаження. Конічна ж

опорна поверхня довантажує кільцеву частину опорної системи, підвищуючи її стійкість, особливо на холостому ходу, а також забезпечує стійкість у радіальному напрямку. Дослідження показали, що за вантажопідйомності 2700 Н і величини середнього зазору з газовим змащенням у 15 мкм, модернізований безконтактний привід має меншу на 8% масу ротора, забезпечує зниження на 37% витрати технологічного повітря на опору і зниження тиску його подачі на 18%, збільшується жорсткість опори на 16% (див. Табл.).

Проведені дослідження дозволили обґрунтувати нові підходи щодо проєктування безконтактного привода обертання на опорах із газовим змащенням як єдиної та регульованої динамічної системи та розробити методику проектування безконтактних приводів на регульованих конічних аеростатичних опорах [13,14].

Список літератури

1. Opory skolzheniya s gazovoj smazkoj [Tekst] / S. A. Shejnberg [i dr.]; pod red. S. A. Shejnberga. – 2-e izd. – M. : Mashinostroenie, 1979. – 335 s.

2. Zhang, H., et al. (2016). High-speed electro-spindle running on air bearings: Design and experimental verification. International Journal of Mechanical Sciences, 87, 9-18.5. Yang, J., et al. (2019). Modeling and analysis of a high-speed spindle with hybrid bearings considering the influence of bearing parameters. Mechanical Systems and Signal Processing, 130, 262-279.

3. Pinegin, S. V. Precizionnye opory kacheniya i opory s gazovoj smazkoj [Tekst]: spravochnik / S. V. Pinegin, A. V. Orlov, Yu. B. Tabachnikov. – M. : Mashinostroenie, 1984. – 216 s. – (Osnovy proektirovaniya mashin).

4. Брешев А.В. Модернизация одноопорного бесконтактного привода для улучшения его технических характеристик / А.В. Брешев // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.. – 2013. – № 17(206) – С. 15 – 21.

5. Пат. 99374 Україна, МПК H01L 21/461 (2006.01) B28D 5/02 (2006.01) Безконтактний шпиндель верстата для різання монокристалів / Носко П.Л., БрешевВ.Є., Карпов О.П., Швагер Л.К., Брешев О.В. ; заявник та патентовласник Східноукраїнський нац. ун-т ім. В. Даля. – № a201015399 ; заявл. 20.12.10; опубл. 10.08.12, Бюл. № 15.

6. Брешев О.В., Носко П.Л., Башта О.В., Радько М.О., Богдан С.Ю., Герасимова О.В. Класифікація, методи розрахунку та напрями технічного удосконалення опор з газовим змащенням. Проблеми тертя та зношування, 3 (108).- 2025. - С.68-82. DOI: 10.18372/0370-2197.3(108).20487

7. Breshev A.V. (2019). Modernization of a single-bearing contactless drive to improve its technical characteristics. Newsletter of the Eastern Ukrainian National University named after V. Dahl,17 (206), (15-21)

8. Синтез аеростатичних опорних систем високошвидкісних приводів: монографія / О.В. Брешев, П.Л. Носко, О.В. Башта, О.В. Радько, Г.О. Бойко. – Київ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2025. –250 с. Електронне видання. URI https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/2590.
https://doi.org/10.33216/MonographSNU(978-617-11-0260-6)-2025-250

9. O.V. Breshev, O.V. Bashta, P.L. Nosko, A.O. Bashta, O.M. Spivak I.V. Semak. Development of a design scheme of a single-support drive system with aerostatic bearings. Problems of friction and wear: наук. техн. журнал - К.: ДУ "КАІ", 2025.-№2(107)-С. 25-31

10. O.V. Breshev, P.L. Nosko, O.V. Bashta, A.O. Bashta, M.O. Radko, V.O. Herasymov. Parameters and characteristics of a single-support drive system with tapered aerostatic bearings. Problems of friction and wear, 2 (107). 2025. pp.32-39.

11 Брешев О.В., Башта О.В., Носко П.Л., Бойко Г.О., Радько О.В. До питання про стійкість руху робочого органу в одновісному безконтактному приводі / Наукові вісті Далівського університету: електрон. наук. фах. вид. / Східноукр. нац. ун-т ім. Володимира Даля. – 2024.

12. Брешев О.В., Носко П.Л., Башта О.В., Харченко А.І., Герасимов В.О., Ладик А.Д. Аналіз конструкцій та підходи щодо проєктування безконтактного привода обертання на опорах із газовим змащенням як єдиної та регульованої динамічної системи / Проблеми тертя та зношування, 2 (103).- 2024. - С.86-106.

13. Брешев О.В., Носко П.Л., Башта О.В., Радько М.О. Створення регульованих конічних аеростатичних опор для безконтактних прямих приводів машин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР, 1.- 2024. -С.10-18.

Отримано: 19 травня 2026
Прийнято: 25 травня 2026
Опубліковано: 18 жовтня 2026

Брешев Олексій Володимирович – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), здобувач, Національний університет "Київський авіаційний інститут", кафедра прикладної механіки та інженерії матеріалів; м. Київ, Україна; e-mail: abreshev@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-4176-775X.

Носко Павло Леонідович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний університет «Київський авіаційний інститут», пр-т Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел. 406-78-42, E-mail: nau12@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-4792-6460.

Бойко Григорій Олексійович – к.т.н., доц., доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, Україна, 01042, E-mail: ednil-uni@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-5065-3200.

Семак Інна Вікторівна - старший викладач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного університету «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: nau12@ukr.net

Башта Алла Олексіївна – к.т.н., доц., доцент кафедри технології оздоровчих продуктів Національного університету харчових технологій, вул. Володимирська 68 м. Київ, Україна, 01601, тел. 289-54-72, https://orcid.org/0000-0003-0310-3788 .

Попов Олександр Вікторович – завідувач кафедри авіаційного транспорту Національного університету «Київський авіаційний інститут», кандидат технічних наук, доцент; просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058; тел.: 406-74-91; E-mail: popche@ukr.net; https://orcid.org/0000-0003-1029-2767

O.V. BRESHEV, P.L. NOSKO, G.O. BOYKO, I.V. SEMAK, A.O. BASHTA, O.V. POPOV

MODERNIZATION OF A SINGLE-SUPPORT CONTACTLESS DRIVE SYSTEM

When modernizing drives and machines, it is generally difficult to achieve significant improvements across all areas critical to operation. The modernization of a single-support contactless drive system involves design changes that improve a number of characteristics and properties, which means that they are complex in nature. Primarily, this involves reducing the rotating masses and the total mass of the drive, increasing the stiffness and load-bearing capacity of the support and rotor, ensuring the stability of the drive's rotation at all speed regimes and under any type of external load, and reducing operating costs (consumption of process air, electrical power, etc.). Based on an analysis of the characteristics of aerostatic supports, areas for improvement were proposed, and the modernization of a single-support aerostatic drive system was realized. This involved transitioning from a symmetrical double-conical design to an asymmetrical conical-ring design, in which the ring-shaped support surface, acting as a support, carries the main load.

Key words: contactless single-support drive, modernization of a single-support system, symmetrical double-conical design, asymmetrical conical-ring design, performance improvement, rotor weight, air consumption, boost pressure, support stiffness.

References

1. Opory skolzheniya s gazovoj smazkoj [Tekst] / S. A. Shejnberg [i dr.]; pod red. S. A. Shejnberga. – 2-e izd. – M. : Mashinostroenie, 1979. – 335 s.

2. Zhang, H., et al. (2016). High-speed electro-spindle running on air bearings: Design and experimental verification. International Journal of Mechanical Sciences, 87, 9-18.5. Yang, J., et al. (2019). Modeling and analysis of a high-speed spindle with hybrid bearings considering the influence of bearing parameters. Mechanical Systems and Signal Processing, 130, 262-279.

3. Pinegin, S. V. Precizionnye opory kacheniya i opory s gazovoj smazkoj [Tekst]: spravochnik / S. V. Pinegin, A. V. Orlov, Yu. B. Tabachnikov. – M. : Mashinostroenie, 1984. – 216 s. – (Osnovy proektirovaniya mashin).

4. Breshev A.V. Modernyzatsyia odnoopornoho beskontaktnoho pryvoda dlia uluchshenyia eho tekhnycheskykh kharakterystyk / A.V. Breshev // Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia.. – 2013. – № 17(206) – S. 15 – 21.

5. Pat. 99374 Ukraina, MPK H01L 21/461 (2006.01) B28D 5/02 (2006.01) Bezkontaktnyi shpyndel verstata dlia rizannia monokrystaliv / Nosko P.L., BreshevV.Ie., Karpov O.P., Shvaher L.K., Breshev O.V. ; zaiavnyk ta patentovlasnyk Skhidnoukrainskyi nats. un-t im. V. Dalia. – № a201015399 ; zaiavl. 20.12.10; opubl. 10.08.12, Biul. № 15.

6. Breshev O.V., Nosko P.L., Bashta O.V., Radko M.O., Bohdan S.Iu., Herasymova O.V. Klasyfikatsiia, metody rozrakhunku ta napriamy tekhnichnoho udoskonalennia opor z hazovym zmashchenniam. Problemy tertia ta znoshuvannia, 3 (108).- 2025. - S.68-82. DOI: 10.18372/0370-2197.3(108).20487

7. Breshev A.V. (2019). Modernization of a single-bearing contactless drive to improve its technical characteristics. Newsletter of the Eastern Ukrainian National University named after V. Dahl,17 (206), (15-21)

8. Syntez aerostatychnykh opornykh system vysokoshvydkisnykh pryvodiv: monohrafiia / O.V. Breshev, P.L. Nosko, O.V. Bashta, O.V. Radko, H.O. Boiko. – Kyiv: Vyd-vo SNU im. V. Dalia, 2025. –250 s. Elektronne vydannia. URI https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/2590. https://doi.org/10.33216/MonographSNU(978-617-11-0260-6)-2025-250

9. O.V. Breshev, O.V. Bashta, P.L. Nosko, A.O. Bashta, O.M. Spivak I.V. Semak. Development of a design scheme of a single-support drive system with aerostatic bearings. Problems of friction and wear: nauk. tekhn. zhurnal - K.: DU "KAI", 2025.-№2(107)-S. 25-31

10. O.V. Breshev, P.L. Nosko, O.V. Bashta, A.O. Bashta, M.O. Radko, V.O. Herasymov. Parameters and characteristics of a single-support drive system with tapered aerostatic bearings. Problems of friction and wear, 2 (107). 2025. pp.32-39.

11 Breshev O.V., Bashta O.V., Nosko P.L., Boiko H.O., Radko O.V. Do pytannia pro stiikist rukhu robochoho orhanu v odnovisnomu bezkontaktnomu pryvodi / Naukovi visti Dalivskoho universytetu: elektron. nauk. fakh. vyd. / Skhidnoukr. nats. un-t im. Volodymyra Dalia. – 2024.

12. Breshev O.V., Nosko P.L., Bashta O.V., Kharchenko A.I., Herasymov V.O., Ladyk A.D. Analiz konstruktsii ta pidkhody shchodo proiektuvannia bezkontaktnoho pryvoda obertannia na oporakh iz hazovym zmashchenniam yak yedynoi ta rehulovanoi dynamichnoi systemy / Problemy tertia ta znoshuvannia, 2 (103).- 2024. - S.86-106.

13. Breshev O.V., Nosko P.L., Bashta O.V., Radko M.O. Stvorennia rehulovanykh konichnykh aerostatychnykh opor dlia bezkontaktnykh priamykh pryvodiv mashyn // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Mashynoznavstvo ta SAPR, 1.- 2024. -S.10-18.

Breshev Oleksii Volodymyrovych - PhD in Engineering, degree applicant, Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National University “Kyiv Aviation Institute”, 1, Lubomyr Huzar Ave. 1, Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: abreshev@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-4176-775X.

Nosko Pavlo Leonidovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National University “Kyiv Aviation Institute”, 1, Lubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, tel. 406-78-42, E-mail: nau12@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-4792-6460.

Boyko Grygorii Oleksiiovych - PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Railway, Road Transport and Hoisting and Transport Machines, V. Dahl East Ukrainian National University, 17 Ioann Pavlo II Str., Kyiv, Ukraine, 01042, E-mail: ednil-uni@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-5065-3200.

Semak Inna Viktorivna - Senior Lecturer, Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National University “Kyiv Aviation Institute”, 1 Lubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, tel. 406-78-42, E-mail: nau12@ukr.net

Bashta Alla Oleksiivna - PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Health Products Technology, National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str. Kyiv, Ukraine, 01601, tel. 289-54-72, https://orcid.org/0000-0003-0310-3788

Popov Oleksandr Victorovich – Head of the Aviation Transport Department, National university «Kyiv Aviation Institute», Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, 1 Lubomyr Huzar ave., Kyiv, Ukrane, 03058, 406-74-91, E-mail: popche@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-1029-2767