

О. В. БРЕШЕВ, П. Л. НОСКО, О. В. БАШТА, М. О. РАДЬКО

СТВОРЕННЯ РЕГУЛЬОВАНИХ КОНІЧНИХ АЕРОСТАТИЧНИХ ОПОР ДЛЯ БЕЗКОТАКТНИХ ПРЯМИХ ПРИВОДІВ МАШИН

Стаття присвячена вдосконаленню безконтактних прямих приводів машин різного призначення створенням регульованих конічних аеростатичних опор. Їх застосування дозволяє зменшити вагу, габарити та витрати повітря, а також завдяки регулюванню характеристик опорних систем забезпечити стійкість обертання роторів у широкому діапазоні швидкостей та навантажень. Для дослідження властивостей приводів та ефективності запропонованих шляхів технічного вдосконалення розроблені математичні моделі одно- та багатоопорних систем приводів. Теоретично визначені функціональні зв'язки між конструктивними, силовими, геометричними параметрами конічних аеростатичних опорних систем при регулюванні зазору зі змащенням, що дозволяє змінювати несучу здатність та динамічні властивості безконтактних приводів. Для аналітичного визначення статичних характеристик приводів запропоновано параметричне приведення їх конічних опор до еквівалентних за жорсткістю і несучою здатністю радіальних опор та упорних під'ятників. Визначено аналітичний критерій стійкості руху ротора одноопорного привода при виникненні коливань та умови роботоздатності регульованих конічних опорних систем, за яких забезпечується статична стійкість приводів при робочих навантаженнях. Створено пневмошпindel на регульованих конічних аеростатичних опорах різної геометрії. Розроблені експериментальна установка та методика натурних випробувань пневмошпиделя, які підтвердили адекватність теоретичних досліджень. Запропонована методика проєктування безконтактних приводів, а для перевірки проєктних рішень розроблено алгоритм комп'ютерного дослідження статичних характеристик і динамічних властивостей опор та всього привода.

Ключові слова: безконтактний прямий привод, конічна аеростатична опора, критерій стійкості, одно- та багатоопорні системи, статико-динамічні характеристики, обчислювальний експеримент

O. BRESHEV, P. NOSKO, O. BASHTA, M. RADKO

DEVELOPMENT OF ADJUSTABLE TAPERED AEROSTATIC BEARINGS FOR NON-CONTACT DIRECT MACHINE DRIVES

The article is devoted to making adjustable conical air bearings. Its application in different machines allows increase load capacity and reliability, speed extension, reduce mass, overall dimensions and air consumption, secure stable rotary motion in speed wide range due to adjustment of static and dynamic characteristics of direct drives. Mathematical models of single-support and multi-support systems have been designed for study of its characteristics and efficiency of suggested improvements. Function relations between structural, functional, geometric parameters of conical aerostatic systems have been theoretically determined for adjustable air gap that allows change load capacity and dynamic characteristics of non-contact direct drives. Method of parametric conversion of conical bearings to radial and thrust bearings has been suggested. It gives analytical solution of non-contact drive static characteristics. Analytical stability criterion of rotor of single-support system has been determined. Working capacity conditions have been analytically obtained from mass and inertial properties, parameters and characteristics of air-bearing direct drive. Adjustable conical air-bearing pneumatic spindle has been manufactured. Experimental set-up and experimental technique have been designed for validation theoretical results. Design procedure of air-bearing non-contact drives has been engineered. Algorithm of numerical experiment of static characteristics and dynamic properties has been engineered for design decision verification.

Keywords: non-contact direct drive, conical aerostatic bearing, stability criterion, single-support and multi-support systems, static and dynamic behaviors, numerical experiment

Вступ. Безконтактні опори та прямі приводи знаходять все більш широке застосування у машинобудуванні, тому що дозволяють значно знизити енерговитрати, розширити діапазони частот обертання роторів, збільшити жорсткість та точність позиціонування виконавчих органів машин. Це підвищує ресурс виконавчих механізмів та інструмента, знижує собівартість машин і продукції машинобудування. Ефективність безконтактних прямих приводів обумовлена мінімальними втратами на тертя в аеростатичних опорах, відсутністю зношування їх робочих поверхонь, а також безконтактною передачею крутного моменту на ротор. Газове змащення в опорах усуває ударні навантаження, виконує функцію гасіння вібрацій та забезпечує екологічність виробництва.

Одним із шляхів підвищення ефективності функціонування безконтактних прямих приводів є вдосконалення конструкцій аеростатичних опор, що надає можливість регулювати несучу здатність, жорсткість, динамічні властивості приводів. Одним із таких рішень є розробка і дослідження безконтактних приводів на регульованих конічних аеростатичних опорах, що дозволить змінювати статичні та динамічні характеристики приводів і забезпечити необхідну стійкість обертання роторів у широких діапазонах швидкостей та навантажень. Але дотепер

теоретичні та практичні питання розробки й дослідження безконтактних приводів на регульованих конічних аеростатичних опорах із різним кутом нахилу опорних поверхонь не розв'язані за відсутністю аналітичного рішення відносно їх несучої здатності та жорсткості. Також не досліджені функціональні зв'язки між конструктивними, силовими, геометричними параметрами конічних аеростатичних опорних систем при регулюванні зазору, тому залишаються невизначеними умови роботоздатності безконтактного прямого привода при статичних навантаженнях та критерії стійкості руху його ротора при виникненні коливань.

Таким чином, вдосконалення безконтактних прямих приводів шляхом створення регульованих конічних аеростатичних опор є актуальним науково-технічним завданням.

Великий внесок у розвиток теорії газового змащення, дослідження динаміки прямих приводів та вдосконалення їх конструкцій зробили відомі вітчизняні та закордонні вчені: Шейнберг С.А., Пинегин С.В., Федотов В.О., Косминін О.В., Кельзон О.С., Левицький М.І., Дроздович В.М., Гросс В.А., Грессем Н.С., Катто Ю., Константиnescу В.Н., Лауб Ж.Г., Морі Х.А.,

© О. В. Брешев, П. Л. Носко, О. В. Башта,
М. О. Радько, 2024

Пауелл Дж. У., Сода Н. та ін. [1–8]. У розробку нових конструкцій безконтактних приводів значний внесок зробили вчені СХУ ім. В. Даля: Швагер Л. К., Брешев В. С., Єрошин С. С., Логунов М. П. [9–13].

Аналіз їхніх наукових праць, а також огляд існуючих конструкцій безконтактних прямих приводів для машин різного призначення дозволив визначити перспективний напрям їх вдосконалення – застосування у приводах конічних аеростатичних опор різної геометрії з регульованою величиною зазору. І якщо теорія розрахунків і методика проектування приводів з аеростатичними радіальними опорами та під'ятниками дотепер розроблені досить добре, завдання створення й дослідження безконтактних прямих приводів на регульованих конічних аеростатичних опорах різної геометрії не вирішені. Складність розподілу газодинамічних параметрів у зазорі з повітряним змащенням конічної

опори спричиняє труднощі для отримання аналітичного рішення відносно її жорсткості або несучої здатності, що не дозволяє визначити у аналітичному вигляді умови необхідної статичної та динамічної стійкості ротора привода, встановити функціональні зв'язки між параметрами при регулюванні конічних опор.

Мета роботи – вдосконалення безконтактних прямих приводів машин створенням регульованих конічних аеростатичних опор, які дозволяють змінювати характеристики приводів та забезпечити необхідну статичну і динамічну стійкість роторів у широких діапазонах швидкостей та навантажень.

Виклад основного матеріалу. Виходячи із мети роботи було досліджено одноопорний безконтактний прямий привод на здвоєній конічній аеростатичній опорі (див. рис. 1, а, б), а також розроблена математична модель одноопорного привода із розрахунковою схемою (див. рис. 1, в).

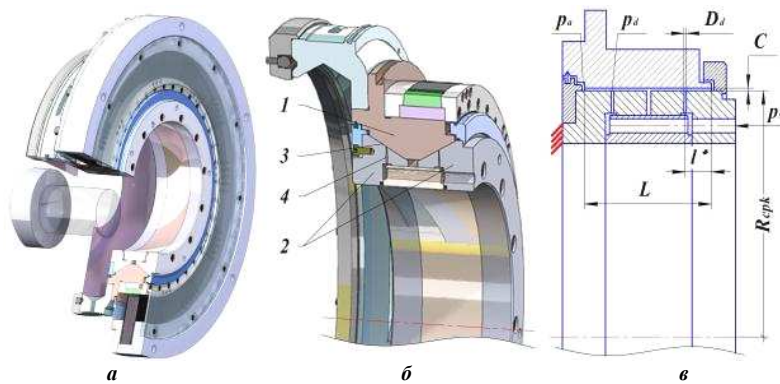


Рисунок 1 – Шпиндельний вузол (а), фрагмент (б) і розрахункова схема (в) його опорної системи по радіальній вантажопідйомності: 1 – рухома частина опорної системи; 2 – нерухома частина опорної системи; 3 – зазор з повітряним змащенням; 4 – живильники (обмежувачі витрати повітря)

Конічна одноопорна система привода складається з рухомої 1 та нерухомої 2 частин, що розділені зазором 3, до якого під тиском подається газове змащення через живильники 4. Її параметричне приведення до еквівалентної за несучою здатністю радіальної опори виконується за геометричними, конструктивними, термо- та газодинамічними параметрами.

У розрахунковій схемі (див. рис. 1, в) показано лише приведення за геометричними параметрами з використанням середнього радіуса конуса R_{cpk} . Запропоноване приведення дозволило вперше одержати аналітичний розв'язок рівняння газового змащення, отриманий методом збурень (МЗ), для дослідження функціональних залежностей і характеристик конічної опорної системи.

При побудові математичної моделі використовується лінійна постановка, за якої несуча здатність W_{rk} пропорційна жорсткості конічної опори K_{rk}^e . Несуча здатність безконтактного привода має дві складові – радіальну W_{rky} та осьову W_{rkz} , а їх величини залежать від кута α нахилу конічної опорної поверхні до осі обертання.

$$W_{rky} = K_{rk}^e C \epsilon_r \cos \alpha, \quad (1)$$

де C – величина зазору з повітряним змащенням;

ϵ_r – відносний радіальний ексцентриситет.

Для визначення K_{rk}^e використовується відомий параметр режиму $\bar{m}$, який залежить від конструктивних особливостей опори та властивостей повітряного змащення (динамічна в'язкість газу μ , швидкість звуку a , відношення густини газу ρ до тиску при даній температурі k , кількість ліній наддування n_d , кількість живильників N та їх діаметр D_d):

$$\bar{m} = 12\mu a \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \cdot \frac{n_d N D_d}{C^2 p_s}.$$

Аналітичне рішення рівняння Рейнольдса відносно K_{rk}^e для конічних аеростатичних опор з живильниками типу кільцевої діафрагми має вигляд:

$$K_{rk}^e = \frac{2\pi\lambda R_{cpk}^2 \sqrt{p_s}}{C \left(ch\lambda + 0.25\bar{m} \left(\frac{p}{p_d} \right)^{-1} \cdot chb\lambda \cdot shb\lambda \right)} \times \left(\frac{shb\lambda \cdot sh\bar{b}\lambda}{\lambda p_d} + I_0 \frac{chb\lambda}{\sqrt{\nu\lambda}} \right), \quad (2)$$

де $\lambda = L/2R$ – відносна довжина опори;

R_{cpk} – середній радіус конічної опори;

$$\mathbf{v} = \bar{p}_d - \bar{p}_a / \lambda \bar{b};$$

p_s, p_a, p_d – тиск подачі повітряного змачення, зовнішній та у зазорі відповідно;

$\bar{p}_d = p_d/p_s$ – відносний протитиск, який визначається шляхом апроксимації Прандтля;

$\bar{p}_a = p_a/p_s$ – відносний тиск газового змачення;

$b = l^*/L$ – відносне розсування ліній живильників;

$$\bar{b} = 1 - b;$$

$$I_0 = \int_b^1 sh \lambda (1-x) / \sqrt{\beta-x} dx.$$

Запропоноване параметричне приведення конічної аеростатичної опори до радіальної опори та підп'ятника (при необхідності розрахунків осевих сил) має достатню точність 5%–10%, перевірену обчислювальними (засобами CAE/CFD) і натурними експериментами. Визначені завдяки аналітичному рішенню характеристики окремих конічних опор та опорних систем використовуються для дослідження статичної й динамічної стійкості безконтактних прямих приводів.

Для аналізу динамічних властивостей одноопорного привода запропоновано використовувати критерій стійкості руху його ротора. Для аналітичного визначення критерію досліджені найгірші динамічні умови – збіг частот коливань зовнішньої сили з власною частотою опори привода (резонанс), а також збіг напрямків початкової швидкості та початкового зсуву ротора. Критерій являє собою співвідношення між параметрами опорної системи у вигляді нерівності. Його отримано на основі енергетичного балансу між роботою зовнішньої збудовальної сили A_p (змінюється за законом $Q(t) = P_0 \sin \omega t$) та роботою сил демпфування змачення опори A_b при коливаннях за однаковий період часу:

$$A_b = b A^2 k^2 \int_0^{2\pi/k} \sin^2 kt dt = \pi b A^2 k. \quad (3)$$

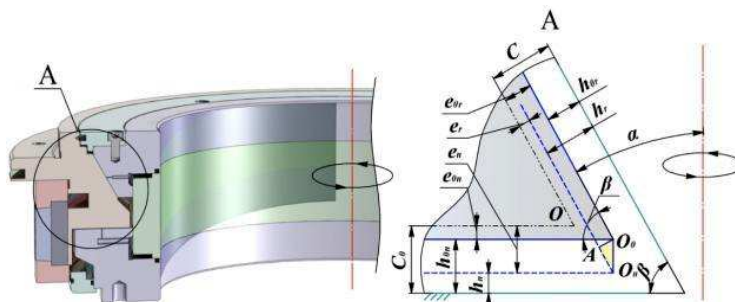


Рисунок 2 – Вдосконалена одноопорна система (а) та її розрахункова схема (б)

Дослідження показали, що при несучій здатності 2700 Н та величині середнього зазору з повітряним змаченням 15 мкм вдосконалий одноопорний безконтактний привод має на 8% меншу масу ротора, забезпечує зниження на 37% витрат технологічного повітря на опору та зниження тиску його подачі на 18%.

$$\begin{aligned} A_p &= P_0 \int_0^{2\pi/\omega} \sin \omega t dt \int_0^{2\pi/\omega} V_x(t) dt = \\ &= P_0 A \omega \int_0^{2\pi/\omega} \sin^2 \omega t dt = \pi \cdot P_0 A, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{де } V_x = \frac{d}{dt} x(t) = -Ak \sin kt;$$

$k = \sqrt{\frac{K_x^\varepsilon}{M}}$ – циклічна частота коливань ротора при вода;

$K_x^\varepsilon = K_r^\varepsilon = \bar{K}_r^\varepsilon \frac{4\lambda R^2 p_s}{C}$ – жорсткість опорної системи згідно (2).

Дорівнюючи (3) і (4), одержуємо $b = \left| \frac{P_0 \sqrt{M}}{A \sqrt{C}} \right|$, а

враховуючи зв'язок енергії E системи з амплітудою A $E = \frac{1}{2} K_x^\varepsilon A^2$, $\Delta E = 2E \frac{\Delta A}{A}$, одержуємо:

$$b \geq \left| \frac{P_0 \sqrt{M}}{A_0 \sqrt{K_x^\varepsilon}} \right| \quad \text{або} \quad 1 \geq \left| \frac{P_0 \sqrt{M}}{b A_0 \sqrt{K_x^\varepsilon}} \right|.$$

Аналітичний критерій стійкості показує, при яких значеннях параметрів і початкових умовах ($M, b, K_x^\varepsilon, P_0, A_0$) ротор привода на конічній опорній системі збереже стійкість руху при коливаннях, навіть при виникненні резонансу.

На основі аналізу характеристик одноопорних систем запропоновані напрямки їх удосконалення. Перший полягає у переході від двох конічних опорних поверхонь до комбінації конічної (для радіальних навантажень) і кільцевої (типу підп'ятника) для найбільшого навантаження осевого напрямку – рис. 2, а.

Як окремий напрямок вдосконалення привода досліджене зовнішнє дроселювання газового змачення завдяки встановленню ущільнювальних кілець. Розрахунки характеристик вдосконаленого привода виконано двома методами: аналітичним МЗ і чисельним методом скінченних елементів (МСЕ).

Визначені аналітично умови роботоздатності регульованої конічної опорної системи. За допомогою розрахункової схеми досліджено її фрагмент з зазорами з повітряним змаченням (рис. 2, б). У вихідному (без навантаження) положенні опори необхідно встановлювати зазори h_{or} і h_{on} з початковими ексцентриситетами e_{or} і e_{on} . Вони повинні бути таки-

ми, щоб під дією вертикального навантаження виникали ексцентриситети e_r і e_n із зазорами h_r та h_n , меншими за середніх розрахункових зазорів C і C_0 конічної та кільцевої частин опорної системи. Тоді умови роботоздатності опорної системи при дії максимально припустимого робочого статичного навантаження, яке врівноважується головним вектором сил реакції, визначаються:

$$W_z \cdot \frac{C_0}{2\pi(R_{\text{вн}}^2 - R_{\text{вн}}^2) p_s} \cdot \frac{2\bar{p}_d + \bar{m} |\ln r_1| \cdot |\dot{\varphi}(\bar{p}_d)|}{\bar{p}_d (1 - 2c^2 \bar{p}_a^2) \bar{W}_n + \bar{p}_d \cdot \bar{p}_a - \bar{p}_a^2 \cdot r_1^2} \leq 0.8 C_0; \quad (5)$$

$$W_z \cdot \frac{C_0}{2\pi(R_{\text{вн}}^2 - R_{\text{вн}}^2) p_s} \cdot \frac{2\bar{p}_d + \bar{m} |\ln r_1| \cdot |\dot{\varphi}(\bar{p}_d)|}{\bar{p}_d (1 - 2c^2 \bar{p}_a^2) \bar{W}_n + \bar{p}_d \cdot \bar{p}_a - \bar{p}_a^2 \cdot r_1^2} \cdot \sin \alpha < 0.9 e_{0r}.$$

Співвідношення (5) відображають умови збереження мінімального припустимого зазору на кільцевій та мінімального відносного ексцентриситету на радіальній частині опорної системи при статичних робочих навантаженнях.

Виконано дослідження багатоопорного безконтактного привода з аеродинамічно незалежними аеростатичними конічними опорами. Аналіз типових конструкцій безконтактних приводів прямої дії дозволив визначити напрямки їх вдосконалення та розробити нову конструкцію привода (пневмошпинделя) з регульованими конічними опорами різної геометрії [14–17] (рис. 3).

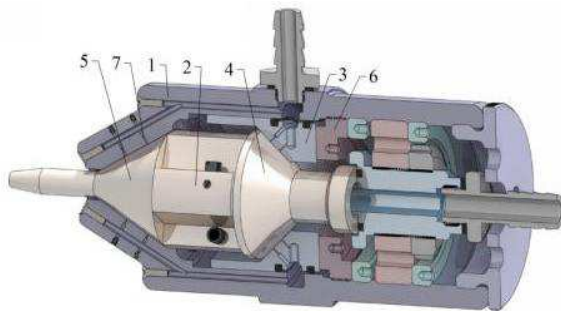


Рисунок 3 – Модель модернізованого безконтактного привода:

- 1 – корпус; 2 – ротор з турбіною; 3 – під'ятник;
4, 5 – конічні аеростатичні опори (права і ліва відповідно);
6 – притискне кільце; 7 – живильники

Розроблений пневмошпиндель, у порівнянні з типовими конструкціями приводів, має наступні вдосконалення:

- система із чотирьох опор (двох радіальних та двох під'ятників для утримання ротора 2 при обертанні) замінені на дві радіально-упорні аеростатичні опори конічної форми 4, 5;

- в конічних опорах регулюються величини середніх зазорів із повітряним змащенням (а, відповідно, жорсткість та несуча здатність всього привода) за допомогою гвинтової пари «корпус 1 – притискне кільце 6», яка визначає положення під'ятника 3;

- конічні опори мають різні кути нахилу робочих поверхонь та довжину (несиметрична опорна система) у відповідності з навантаженням;

- збільшена кількість ліній живильників 7 для подачі повітряного змащення на найбільш навантаженій лівій конічній опорі 5.

Ефективність запропонованих вдосконалень у модернізованому приводі досліджена двома методами: аналітичним і чисельним (постановкою обчислювальних експериментів МСЕ). Для знаходження аналітичного рішення, аналогічно з одноопорною системою, використовувалося запропоноване параметричне приведення. Розроблена розрахункова схема, у якій параметрам конічної опори (геометричним, конструктивним, газо- та термодинамічним) поставлені у відповідність параметри еквівалентної за підйомними силами системи з аеростатичної радіальної опори і упорному під'ятнику з відомими аналітичними рішеннями. Розбіжність між результатами розрахунків різними методами знаходиться у межах 2.1%–9.2%.

На основі аналізу результатів розрахунків осьової підйомної сили W_{ekz} чисельним методом (МСЕ) та визначення W_{ekz} аналітичним методом (МЗ) при $e = 0$ мкм отримана формула, яка визначає залежність W_{ekz} від радіального ексцентриситету e для конічних аеростатичних опор:

$$W_{ekz}(e) = 0.25 p_s \cdot W_z(0) - 0.35 p_s \cdot e.$$

На рис. 4 наведені залежності W_{ekz} та W_{eky} лівої опори пневмошпинделя від e (при тиску повітря $p_s = 0.5$ МПа), отримані аналітичним та чисельним методами.

Розподіл тиску повітряного змащення вздовж зазору має складний і нерівномірний характер зі зниженням за напрямками твірної, що зменшує несучу здатність опори, насамперед радіальну.

Перетворення двох ліній по 12 живильників до трьох по 8 живильників дозволяє підняти тиск повітряного змащення на середній ділянці опори та зробити її більш ефективною щодо підйомних сил (рис. 5).

Виконані чисельні розрахунки МСЕ на моделі (див. рис. 3) показали зростання підйомних сил опори не менш, ніж на 7...10%.

Для дослідження динаміки багатоопорної системи були застосовані класичні методи теоретичної механіки (рівняння Лагранжа другого роду, теорема Кьонига). Розроблена модель, у якій дії повітряного змащення в опорах замінені на рівні їм по пружних властивостях умовні пружини.

Потенційні енергії лівої Π_L і правої Π_{II} опор із жорсткостями K_L^e й K_{II}^e :

$$\Pi_L = \frac{1}{2} K_L^e (f_L + y - l_1 \phi)^2 - \frac{1}{2} K_L^e f_L^2,$$

$$\Pi_{II} = \frac{1}{2} K_{II}^e (f_{II} + y + l_2 \phi)^2 - \frac{1}{2} K_{II}^e f_{II}^2.$$

Тоді потенційна енергія всієї опорної системи привода:

$$\Pi = -mgy + \frac{1}{2} K_L^e (f_L + y - l_1 \phi)^2 + \frac{1}{2} K_{II}^e (f_{II} + y + l_2 \phi)^2 - \frac{1}{2} K_L^e f_L^2 - \frac{1}{2} K_{II}^e f_{II}^2.$$

На підставі рівняння Лагранжа та після елементарних перетворень отримані диференціальні рівняння малих вільних коливань ротора безконтактного привода:

$$m\ddot{y} + (K_{\text{Л}}^{\varepsilon} + K_{\text{П}}^{\varepsilon})y + (K_{\text{П}}^{\varepsilon}l_2 - K_{\text{Л}}^{\varepsilon}l_1)\varphi = 0,$$

$$I_C\ddot{\varphi} + (K_{\text{П}}^{\varepsilon}l_2 - K_{\text{Л}}^{\varepsilon}l_1)y + (K_{\text{Л}}^{\varepsilon}l_1^2 + K_{\text{П}}^{\varepsilon}l_2^2)\varphi = 0.$$

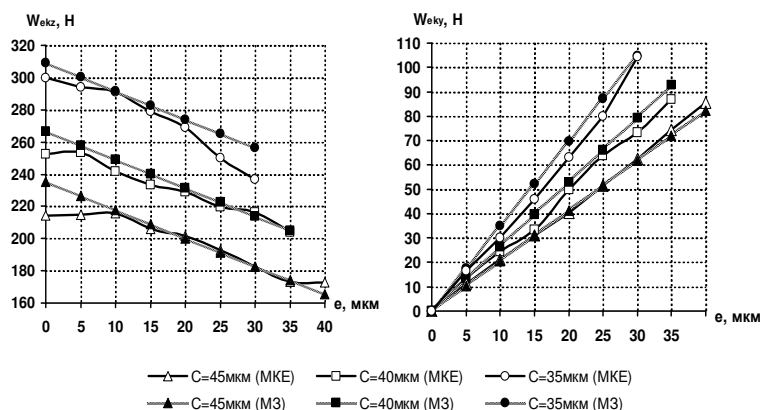


Рисунок 4 – Залежності осьової (а) та радіальної (б) підйомних сил від радіального ексцентриситету

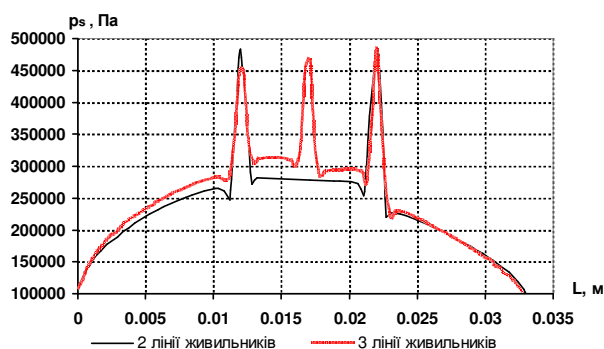


Рисунок 5 – Характер зміни тиску уздовж твірної конуса опори

Із загальним розв'язком:

$$y = \mu_1 B_1 \sin(k_1 t + \varepsilon_1) + \mu_2 B_2 \sin(k_2 t + \varepsilon_2),$$

$$\varphi = B_1 \sin(k_1 t + \varepsilon_1) + B_2 \sin(k_2 t + \varepsilon_2).$$

Вони дозволяють визначити положення ротора в будь-який момент часу та частоти двох спільних вільних коливань ротора у площині з віссю обертання.

На рис. 6 показана оцінка ефективності модернізації багатоопорного привода. При однаковій несучій багатопорний модернізований привод має знижену масу на 11%, зменшені на 17.3% габаритні розміри, потребує витрат технологічного повітря на 25% менше.

З метою підтвердження результатів теоретичних розрахунків характеристик за аналітичним рішенням проведені експериментальні дослідження, представлена розроблена експериментальна установка, запропонована методика експериментальних досліджень, у якій обґрунтовано вибір і розкрито зміст статистичних методів обробки отриманих результатів, а також їх оцінка.

Експериментальна установка дозволяє виконати натурні випробування створеного пневмошпинделя на регульованих конічних аеростатичних опорах різної геометрії та дослідити його статико-

динамічні характеристики при регулюванні зазору: жорсткість, максимальну підйомну силу (несучу здатність), швидкість обертання ротора, витрату технологічного повітря окремо на опорну систему та турбіну, крутний момент на роторі, биття валу тощо.

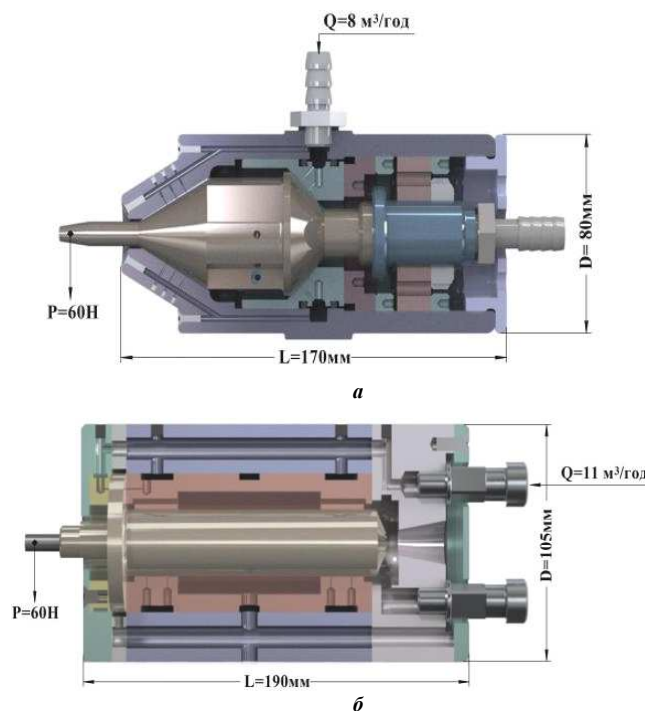


Рисунок 6 – Порівняння приводів різних конструкцій: а – модернізований, б – типовий

Конструкція розробленого модернізованого пневмошпинделя з регульованими конічними опорами була представлена на рис. 3, а виготовлений його експериментальний зразок (у розібраному стані) показаний на рис. 7.

Схема експериментальної установки представлена на рис. 8.

В експериментальній установці повітря до привода подається від компресора 1 через фільтр 4 та сепаратор 5.

ратор масла і вологи 5, а регулюється вентилями 8, 9 та редукторами 6, 11 із замірами витрат лічильниками 4, 10. Результати експериментальних досліджень радіальної та осової підйомних сил пневмошпинделя (вимірюються динамометрами 14 та 15) у режимі підвісу в залежності від тиску p_s (вимірюється манометрами 2, 7, 12), а також величини середнього зазору C і порівняння їх з теоретичними даними показані на рис. 9, 10.



Рисунок 7 – Пневмошпиндель у розібраному стані

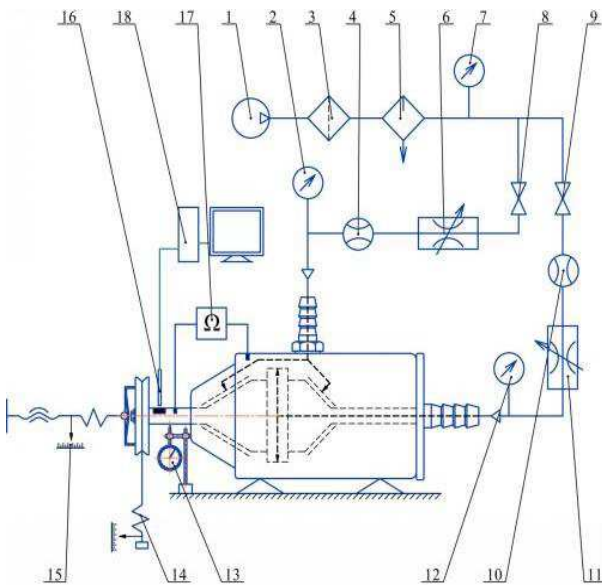
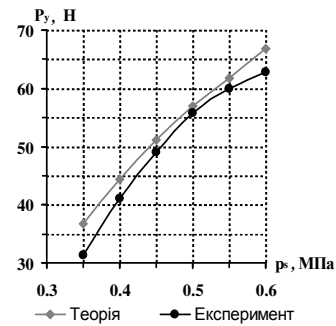


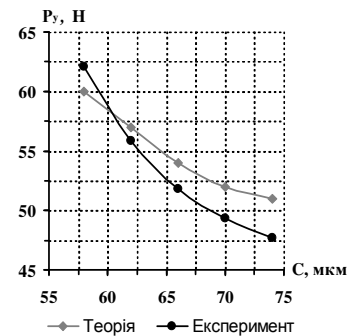
Рисунок 8 – Експериментальна установка:

1 – компресор з ресивером; 2, 7, 12 – манометри; 3 – фільтр; 4, 10 – лічильники витрат; 5 – сепаратор масла і вологи; 6, 11 – редуктори; 8, 9 – вентиля; 13 – мікрометр; 14, 15 – динамометри; 16 – датчик обертів; 17 – омметр; 18 – АЦП

Обговорення результатів. Аналіз представлених залежностей показує, що результати, отримані експериментальним шляхом, відрізняються на 5%–12% від теоретичних, отриманих завдяки чисельному рішенню МСЕ. Регулювання сумарного зазору в конічній аеростатичній багатоопорній системі дозволяє змінювати осову підйомну силу до 21% та радіальну – до 16%. Підстроюванням опорної системи забезпечуються необхідні статична та динамічна стійкості ротора у широких діапазонах швидкостей та навантажень. Відповідно до рис. 8 швидкість обертання замірюється датчиком обертів 16 з АЦП 18, а втрата стійкості руху ротора фіксується омметром 17 при торканні рухомих та нерухомих опорних поверхонь.

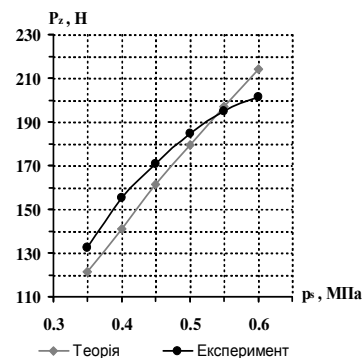


а

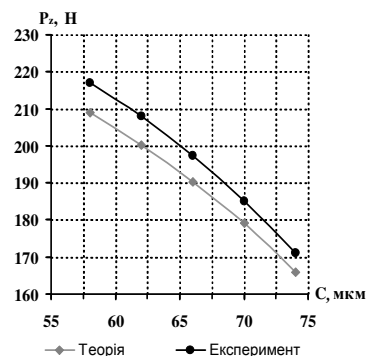


б

Рисунок 9 – Залежності радіальної підйомної сили від тиску p_s (а) і зазору C (б)



а



б

Рисунок 10 – Залежності осової підйомної сили від тиску p_s (а) і зазору C (б)

Завдяки експериментальним дослідженням вирішені наступні завдання:

- досліджені статичні характеристики багатоопорного пневмошпинделя в режимі підвісу з регулюванням вхідних параметрів (зазорів, тиску повітря);
- досліджені статико-динамічні характеристики та

динамічні властивості пневмошпинделя при обертанні з регулюванням входних параметрів (зазору, тиску, частоти обертання, навантаження);

– перевірена адекватність розробленої математичної моделі – результатів розрахунків характеристик за аналітичним рішенням, отриманим на основі запропонованого параметричного приведення конічних опорних систем до еквівалентних за жорсткістю та несучою здатністю радіальних і упорних;

– перевірена адекватність обчислювального комп'ютерного експерименту щодо визначення статико-динамічних характеристик безконтактного привода;

– експериментально перевірена ефективність регулювання статичної та динамічної стійкості пневмошпинделя зміною величин зазорів у його опорах.

На основі проведених досліджень розроблена методика проєктування безконтактних приводів на конічних аеростатичних опорах відповідно до заданих навантажень і умов функціонування, надані рекомендації щодо їх технічного вдосконалення.

Методика включає п'ять напрямків та алгоритм проєктувального розрахунку аеростатичної конічної опорної системи за заданим робочим навантаженням на привод. Для його реалізації запропоновано визначати у першому наближенні середній діаметр D_{cp} конічної опорної поверхні співвідношенням:

$$D_{cp} = \sqrt{\frac{W_r}{\Delta p \eta}} = 3.54 \sqrt{W_r}$$

де Δp – різниця середніх значень тисків подачі повітря в опору та на виході з неї;

$\eta = 0.2$ – коефіцієнт навантаження (при максимальних значеннях відносних ексцентриситетів).

Визначені додаткові шляхи підвищення несучої здатності безконтактних приводів. Досліджена ефективність застосування в конічних аеростатичних опорах зенкування живильників і встановлення прямооточних лабіринтових ущільнень. Таке вдоско-

налення правої опори пневмошпинделя (див. рис. 3, 7) призвело до значного поліпшення характеристик усієї опорної системи. Якщо до проведення модернізації максимальна підйомна сила привода становила 60 Н, то після посилення правої опори – 71 Н (зростання 18.5%). При цьому, через перерозподіл величин зазорів, витрати повітря правої модернізованої опори зросли з 2.02 до 2.70 м³/год., а лівої – зменшились з 3.5 до 1.8 м³/год., витрати повітря всієї багатоопорної системи привода зменшилися на 1.02 м³/год. (38%). Зміна розподілу тиску змачення в правій опорі після вдосконалення характеризується загальним підвищенням (затемнені області) та зростанням перепаду тиску між верхньою та нижньою частинами опори при $e \neq 0$ (рис. 11).

Для перевірки ефективності запропонованих проєктних рішень і вдосконалень розроблено алгоритм комп'ютерного дослідження динамічних властивостей привода (критичних частот обертання, відгуку на дисбаланс, траєкторії руху та амплітуд коливань ротора) при перехресному впливі геометричних, конструктивних і газодинамічних параметрів. Розрахунки в середовищі САПР коливань (орбітального руху) лівої опори показані на рис. 12.

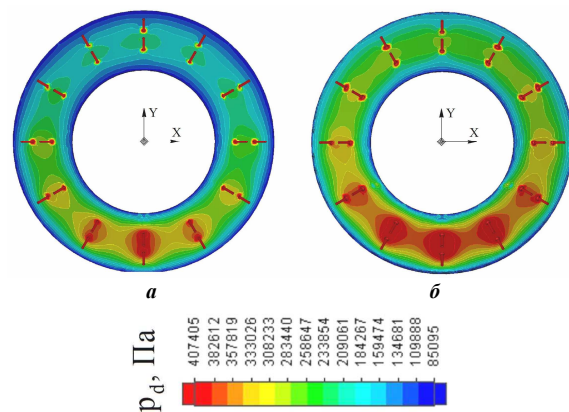


Рисунок 11 – Розподіл повітряного змачення в зазорах опори p_d при однаковому ексцентриситеті e до (а) і після (б) її вдосконалення

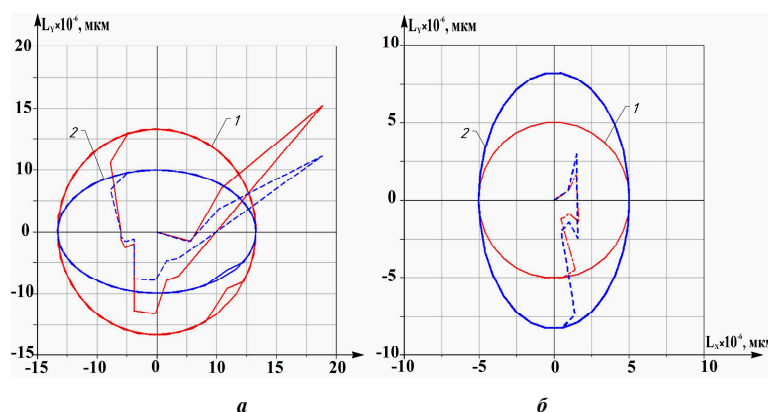


Рисунок 12 – Орбітальний рух опори до (а) і після (б) модернізації привода:
1 – коливання без навантаження; 2 – коливання під навантаженням

Технічне вдосконалення призвело до значного (більш, ніж у 2 рази) зниження амплітуди коливань опор ротора на холостому ході, який є найнебезпечнішим для стійкості аеростатичних опор, і до 30% – під робочим навантаженням.

Висновки. У роботі проведено вдосконалення безконтактних прямих приводів машин створенням регульованих конічних аеростатичних опор. Розроблені та досліджені приводи з конічними опорними системами характеризуються простотою конструкції,

меншими масою, габаритами та витратами повітря, а також регульованістю характеристик, що забезпечує необхідну статичну і динамічну стійкість роторів у широкому діапазоні швидкостей та навантажень.

Одержали подальший розвиток математичні моделі механічних систем одно- та багатоопорного безконтактних прямих приводів на конічних аеростатичних опорах різної геометрії. За їх допомогою досліджено характеристики приводів та вплив регулювання величини зазору зі змащенням в конічних опорах на функціональні зв'язки між їх параметрами, на характеристики та динамічну стійкість всього привода. Показано, що регульованість конічної опорної системи безконтактного приводу дозволяє змінювати радіальну підйомну силу до 16%, осьову – до 21%, жорсткість – до 61% та власні частоти – до 28%, що надає можливість налагоджувати привод під вимоги застосування.

Для аналітичного визначення статико-динамічних характеристик приводів методом збурень запропоновано параметричне приведення їх конічних опор до еквівалентних за жорсткістю і несучою здатністю радіальних та упорних. Адекватність приведення багатоопорної конічної системи підтверджена комп'ютерними обчислювальними експериментами. Вони виконані МСЕ на тривимірній моделі безконтактного приводу у програмі газодинамічного аналізу. При кроці зміни ексцентриситету 5 мкм розбіжність між результатами розрахунків різними методами знаходиться у межах 2.1%–9.2%.

На основі аналізу конструкцій і характеристик аеростатичних опор запропоновані напрямки вдосконалення одноопорної системи безконтактного привода. Вони полягають у комбінуванні опорних поверхонь конічної та кільцевої форми, застосуванні зовнішнього дроселювання. Дослідження показали, що при несучій здатності 2700 Н та середньому зазорі з повітряним змащенням 15 мкм вдосконалий одноопорний привод має меншу на 8% масу ротора, підвищену на 16% жорсткість, забезпечує зниження на 37% витрат технологічного повітря.

Аналітично визначені умови роботоздатності регульованої конічної опорної системи, а саме – безконтактного привода. Вони функціонально пов'язують геометричні, газодинамічні параметри, масу, статичні характеристики аеростатичної опори та встановлені в ній початкові зазори при налагодженні, за яких забезпечується статична стійкість ротора привода при робочих навантаженнях.

На основі енергетичного балансу процесу коливань отримано аналітичний критерій стійкості руху ротора безконтактного одноопорного привода

$$1 \geq \left| \frac{P_0 \sqrt{M}}{b A_0 \sqrt{K_x^e}} \right|$$

Він зв'язує параметри одноопорної системи з початковими умовами коливального руху, а його виконання забезпечує стійкий рух ротора при виникненні резонансу.

Досліджені основні напрямки вдосконалення багатоопорного безконтактного привода. Показано,

що застосування конічних опор, у порівнянні з традиційними конструкціями, дозволяє знизити масу привода на 11%, габарити – на 17.3%, витрати повітря – на 25%. Використання конічних опор різної геометрії знижує масу та габарити привода до 8%. Зенкування живильників та встановлення прямооточних лабіринтових ущільнень підвищує осьову підйомну силу пневмошпинделя на 30%, а радіальну – на 18.5% при зниженні витрат повітря на 38%.

Для перевірки результатів теоретичних досліджень створено пневмошпиндель з регульованими конічними опорами різної геометрії, розроблені експериментальна установка та методика експериментів. Випробування пневмошпинделя показали, що експериментальні характеристики відрізняються від отриманих теоретичними методами на 5% – 8% по радіальній силі, на 8% – 15% – по осьовій підйомній силі та жорсткості, підтверджена ефективність регулювання опор привода для досягнення необхідної статичної та динамічної стійкості ротора.

Розроблена методика проєктування безконтактного привода на регульованих конічних аеростатичних опорах, яка включає розробку компоновальної та розрахункової схем, оцінку статичної та динамічної стійкості, проєктувальний розрахунок конічної опорної системи за заданим навантаженням на привод. Для перевірки проєктних рішень розроблено алгоритм та проведені чисельними методами дослідження впливу регулювання величини зазору опор на характеристики та динамічні властивості приводів (несучу здатність, критичні частоти обертання, відгуки на дисбаланс, траєкторії та амплітуди коливань ротора) при перехресному впливі конструктивних, геометричних, газодинамічних параметрів і робочого навантаження.

Оціночний економічний ефект від застосування розроблених безконтактних приводів досягається: зниженням собівартості завдяки зменшенню кількості високоточних за геометричними параметрами опор (з 2 до 4) та загальної кількості деталей (до 20%); зменшенням витрат технологічного повітря (на 25% – 38%); підвищенням ремонтпридатності.

Список літератури

1. Пешти, Ю. В. *Газовая смазка* [Текст] / Ю. В. Пешти. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. 381 с.
2. Павлище, В. Т. *Основи конструювання та розрахунок деталей машин* [Текст] / В. Т. Павлище. Львів: Афіша, 2003. 560 с.
3. *Теория механизмов и машин. Терминология* [Текст]: Учеб. пособ. / Н. И. Левитский [и др.]; под ред. К. В. Фролова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 80 с.
4. Дроздович, В. Н. *Газодинамические подшипники* [Текст] / В. Н. Дроздович. – Л.: Машиностроение, 1976. – 208 с.
5. Константи́неску, В. Н. *Газовая смазка* [Текст] / В. Н. Константи́неску; пер. с рум. Г. П. Махо; под ред. М. В. Коровчинского. М.: Машиностроение, 1968. 709 с.
6. Пинегин, С. В. *Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой* [Текст]: справочник / С. В. Пинегин, А. В. Орлов, Ю. Б. Табачников. М.: Машиностроение, 1984. 216 с. (Основы проектирования машин).
7. Федотов, В. О. *Газові підвіси шпиндельних вузлів* [Текст]: монографія / В. О. Федотов, І. В. Федотова. Вінниця: Вид-во ВНТУ, 2010. 244 с.
8. Genta, G. *Vibration Dynamics and Control* [Text] / G. Genta. – Springer Science and Media Business Media, LLC, 2009. 855 p.
9. Ерошин, С. С. *Повышение эффективности машин применением рабочих органов без механических опор* [Текст] / С. С.

- Ерошин, В. Е. Брешев. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2005. №5(17). С. 82–85.
10. Nosko, P. The concept of creating non-contact drive for working bodies in machines of various purpose [Text] / P. Nosko, V. Breshev, P. Fil. *Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture*. Lublin, 2008. Vol. VIIIA. P. 126–133.
 11. Брешев, А. В. Модернизация конструкции многоопорного бесконтактного привода на аэростатических подшипниках [Текст] / А. В. Брешев, А. П. Карпов, В. Е. Брешев. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2012. № 6(177). Ч.1. С. 339–344.
 12. Nosko, P. Developments in technology of non-contact drives for working machines [Text] / P. Nosko, A. Breshev, P. Fil, V. Breshev. *Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture*. Lublin, 2010. Vol. XC. P. 209–216.
 13. Брешев В. Е. Совершенствование ресурсосберегающих приводов бесконтактного типа [Текст] / В. Е. Брешев, А. А. Афошин. *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр.* Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2016. № 2 (17). С. 106–112.
 14. Пат. 96695 Україна, МПК (2011. 01), F04D 1/00. *Відцентрово-вихровий насос* [Текст] / П. Л. Носко, В. Є. Брешев, П. В. Філь, О. В. Брешев; заявник та патентовласник Східноукраїнський нац. ун-т ім. В. Даля. № а201011303; заявл. 22.09.10; опубл. 25.11.11, Бюл. № 22. 4 с.
 15. Пат. 74026 Україна, МПК (2012.01) F16C 32/00 *Аеростатична опора обертання* [Текст] / П. Л. Носко, В. Є. Брешев, О. В. Брешев; заявник та патентовласник Східноукраїнський нац. ун-т ім. В. Даля. № u201204998; заявл. 23.04.12; опубл. 10.10.12, Бюл. № 19. 4 с.
 16. Пат. 98084 Україна, МПК F16C 32/06 (2006. 01). *Шпиндельний вузол з газовими опорами* [Текст] / П. Л. Носко, В. Є. Брешев, О. В. Брешев; заявник та патентовласник Східноукраїнський нац. ун-т ім. В. Даля. № а201106472; заявл. 23.05.11; опубл. 10.04.12, Бюл. № 7. 4 с.
 17. Пат. 104690 Україна, МПК F16C 32/06 H01L 21/461 B28D 5/02 (2006.01) *Безконтактний шпиндель верстата для різання монокристалів* [Текст] / В. Є. Брешев, О. В. Брешев, О. П. Карпов; заявник та патентовласник Східноукраїнський нац. ун-т ім. В. Даля. № а201301139; заявл. 30.01.13; опубл. 25.02.14, Бюл. № 4. 4 с.
 5. Drozdovich, V. N. *Gazodinamicheskie podshipniki* [Tekst]. L. : Mashinostroenie, 1976. 208 p.
 6. Konstantinesku, V. N. *Gazovaya smazka* [Tekst] / V. N. Konstantinesku; per. s rum. G. P. Maho; pod red. M. V. Korovchinskogo. M. : Mashinostroenie, 1968. 709 p.
 7. 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 p. – (Osnovy proektirovaniya mashin).
 8. Fedotov, V. O. *Gazovi pidvisi shpindelnih vuzliv* [Tekst]: monografiya / V. O. Fedotov, I. V. Fedotova. Vinnicya: Vid-vo VNTU, 2010. 244 p.
 9. Genta, G. *Vibration Dynamics and Control* [Text] / G. Genta. – Springer Science and Media Business Media, LLC, 2009. 855 p.
 10. Nosko, P. The concept of creating non-contact drive for working bodies in machines of various purpose [Text] / P. Nosko, V. Breshev, P. Fil. *Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture*. Lublin, 2008, vol. VIIIA, pp. 126–133.
 11. Breshev, A. V. Modernizaciya konstrukcii mnogoopornogo beskontaktnogo privoda na aerostaticeskikh podshipnikah [Tekst] / A. V. Breshev, A. P. Karpov, V. E. Breshev. *Visnik Shidnoukrayinskogo nacionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalia*. 2012, no. 6(177), Ch.1, pp. 339–344.
 12. Nosko, P. Developments in technology of non-contact drives for working machines [Text] / P. Nosko, A. Breshev, P. Fil, V. Breshev. *Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture*. Lublin, 2010, vol. XS, pp. 209–216.
 13. Breshev V. E. Sovershenstvovanie resursosberegayushih privodov beskontaktnogo tipa [Tekst] / V. E. Breshev, A. A. Afoshin. *Resursosberegayushie tehnologii proizvodstva i obrabotki davleniem materialov v mashinostroenii: Sb. nauch. tr.* Lugansk: Izd-vo LNU im. V. Dalia, 2016, no. 2 (17), pp. 106–112.
 14. Pat. 96695 Ukrayina, MPK (2011. 01), F04D 1/00. *Vidcentrovovihrovij nasos* [Tekst] / P. L. Nosko, V. Ye. Breshev, P. V. Fil, O. V. Breshev; zayavnik ta patentovlasnik Shidnoukrayinskij nac. un-t im. V. Dalia. № a201011303; zayavl. 22.09.10; opubl. 25.11.11, Byul. No. 22, 4 p.
 15. Pat. 74026 Ukrayina, MPK (2012.01) F16C 32/00 *Aerostaticzna opora obertannya* [Tekst] / P. L. Nosko, V. Ye. Breshev, O. V. Breshev; zayavnik ta patentovlasnik Shidnoukrayinskij nac. un-t im. V. Dalia, no. u201204998; zayavl. 23.04.12; opubl. 10.10.12, Byul. no. 19, 4 p.
 16. Pat. 98084 Ukrayina, MPK F16C 32/06 (2006. 01). *Shpindelnij vuzol z gazovimi oporami* [Tekst] / P. L. Nosko, V. Ye. Breshev, O. V. Breshev; zayavnik ta patentovlasnik Shidnoukrayinskij nac. un-t im. V. Dalia. no. a201106472; zayavl. 23.05.11; opubl. 10.04.12, Byul. no. 7, 4 p.
 17. Pat. 104690 Ukrayina, MPK F16C 32/06 H01L 21/461 B28D 5/02 (2006.01) *Bezkontaktnij shpindel verstata dlya rizannya monokristaliv* [Tekst] / V. Ye. Breshev, O. V. Breshev, O. P. Karpov; zayavnik ta patentovlasnik Shidnoukrayinskij nac. un-t im. V. Dalia. – no. a201301139; zayavl. 30.01.13; opubl. 25.02.14, Byul. no. 4, 4 p.

References (transliterated)

1. Peshti, Yu. V. *Gazovaya smazka* [Tekst] (1993). M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 381 p.
2. Pavlishe, V. T. (2003). *Osnovi konstruyuvannya ta rozrahunok detalej mashin* [Tekst]. Lviv: Afisha, 560 p.
3. *Teoriya mehanizmov i mashin. Terminologiya* [Tekst]: Ucheb. posob. / N. I. Levitskij [i dr.]; pod red. K. V. Frolova. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2004. 80 p.
4. Eroshin, S. S. Povyshenie effektivnosti mashin primeneniem rabochih organov bez mehanicheskikh opor [Tekst] / S. S. Eroshin, V. E. Breshev. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. 2005, no. 5(17), pp. 82–85.

Відомості про авторів /About the Authors

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

Носко Павло Леонідович / Nosko Pavlo – доктор технічних наук (Dr. habil. of Eng. S.), професор, Національний авіаційний університет, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів; м. Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0003-4792-6460>; e-mail: nosko_p@ukr.net

Башта Олександр Васильович / Bashta Oleksandr – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Національний авіаційний університет, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів; м. Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-7914-897X>; e-mail: oleksandr.bashta@npp.nau.edu.ua

Радько Максим Олегович / Radko Maksym – Національний авіаційний університет, здобувач вищої освіти ступеня магістра за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», освітньо-професійна програма «Прикладна механіка, стандартизація та оцінювання якості технічних систем»; м. Київ, Україна; e-mail: nau12@ukr.net

Надійшло (received) 16.04.2024