

УДК 621.891 (043.3)

DOI: 10.18372/0370-2197.2(103).18675

О. БРЕШЕВ, О. БАШТА, П. НОСКО, А. ХАРЧЕНКО, В. ГЕРАСИМОВ,
А. ЛАДИК

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА ПІДХОДИ ЩОДО ПРОЄКТУВАННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ПРИВОДА ОБЕРТАННЯ НА ОПОРАХ ІЗ ГАЗОВИМ ЗМАЩЕННЯМ ЯК ЄДИНОЇ ТА РЕГУЛЬОВАНОЇ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ

Представлено порівняльний аналіз конструкцій безконтактних приводів обертання на опорах із газовим змащенням, які використовують у машинах і механізмах різного призначення - мікротурбінних генераторах, двокоординатних столах переміщень, пневмошипінделях, верстатах різання монокристалів. Показано техніко-технологічні переваги безконтактних прямих приводів обертання з опорами на газовому мастилі. Обґрунтовано підходи щодо проектування приводу як єдиної та регульованої динамічної системи, характеристики якої встановлюються та коригуються зміною конструкції, технологічних параметрів і регулюванням аеростатичних опор.

Ключові слова: безконтактний привод, опори із газовим змащенням, проектування приводу, аеростатичні опори, динамічна система

Вступ. Безконтактні опори, в яких рухомі й нерухомі опорні поверхні деталей розділені газовим, рідинним або газо-рідинним змащенням, а реакції опор передаються без твердотілого механічного контакту - за допомогою гідرو- або газодинамічних сил, - дають змогу реалізувати цілу низку техніко-технологічних переваг і підвищити ефективність машин різного призначення.

Відсутність механічного (між твердими тілами) контакту між шипом і підшипником або п'ятою та підп'ятником, а також контакту через проміжні тіла (за умови використання підшипників кочення) дає змогу значно зменшити втрати на тертя та практично унеможливити зношування в опорах, максимально розширити діапазон частот обертання та робочих температур від -2500 до +8000 С, збільшити технічний ресурс та стабільність параметрів опор у разі тривалої експлуатації, унеможливити ударні навантаження й підвищити їхню вібростійкість, а в багатьох випадках одержати суттєвий вплив на ефективність машин.

Основна частина.

У сучасному машинобудуванні та приладобудуванні найбільшого поширення набули такі безконтактні опори обертального руху:

- підшипники з газовим змащенням;
- підшипники з рідинним мастилом;
- електромагнітні підшипники;
- комбіновані опори (газوماгнітні та ін.).

Діапазон безконтактних опор за навантажувальною здатністю від часток або одиниць Ньютона (гіроскопічні прилади) до 150 000 Н і більше (у металорізальних верстатах, газотурбінних установках), а також максимальний швидкісний діапазон - від кількох обертів на хвилину до 600 000 об/хв (центрифуги, турбодетандери, пневмошипінделі) - забезпечили безконтактним опорам застосування практично у всіх типах машин. Сфера їх застосування нині

інтенсивно розширюється через неухильну тенденцію підвищення швидкостей обертання. За низкою напрямів, наприклад, у надвисокошвидкісних (понад 100 000 об/хв) приводах і криогенних машинах, безконтактні опори мають абсолютний пріоритет перед підшипниками кочення, які, загалом, найчастіше використовують у машинобудуванні [1].

Максимальну ефективність від використання таких опор можна отримати саме в приводі прямої дії (прямому приводі) [2], тому що для нього характерне передавання крутного моменту на вал так само без механічного контакту. Прямий привід на опорах із газовим змащенням у цьому разі стає повністю безконтактним - вал приводиться в обертання й утримується в просторі без будь-якого механічного контакту між деталями, що здійснюють відносний рух. Конструктивна схема прямого приводу є найбільш раціональною, тому що характеризується найменшим числом деталей (відсутність проміжних передач), має мінімальну масу ротора і найкоротший шлях силового потоку (корисної потужності), а, отже, і мінімальні втрати [1].

Так, у високошвидкісних пневмошпинделях крутний момент на валу створюється газодинамічними силами від потоку газу, що діють на лопатки турбіни, а опорами є підшипники з газовим (повітряним) змащуванням, в яких сили газодинамічної природи створюють сили реакції і забезпечують "левітацію" або "підвішування" вала в повітряному змащуванні [2]. Газ є елементом приводу (машини), який забезпечує взаємодію деталей, що не контактують безпосередньо одна з одною, він створює пружні сили реакції в опорах і крутний момент на валу [3]. Безконтактна передача крутного моменту на вал і утримування його в просторі силами газового мастила дають змогу реалізувати низку технічних переваг (конструктивних, технологічних, швидкісних, техніко-економічних) для підвищення функціональності приводного устаткування, які й буде досліджено в цій роботі.

Принципи дії, основи конструювання, силовий аналіз і параметричний синтез безконтактних приводів обертального руху з кільцевими робочими органами (КРО) були розглянуті в роботах [4 - 15]. Досліджено динаміку та кінематику приводів робочих машин, які не мають валів з опорами традиційних конструкцій, а робочі органи утримуються та приводяться в обертання силами різної природи, що діють безпосередньо на них. КРО обертаються під дією електродинамічних сил, а утримуються електродинамічними у поєднанні з газо- або гідродинамічними силами, силами в'язкого опору і поверхневого тертя, що демпфують (комбінований характер опор). Комбінація сил залежить від призначення та конструктивного виконання конкретної машини. Основну увагу в дослідженнях [4, 5, 15] було приділено концептуальній розробці прямого приводу з робочим органом без механічних опор. Запропоновано просторовий такий розподіл потенційних рушійних сил, за якого одночасно формуються на КРО крутний момент (головний момент) для здійснення корисної роботи та головний вектор для забезпечення стійкості просторового положення. При цьому головний вектор завжди перебуває в негативному зворотному зв'язку зі зміщенням КРО. Поєднання робочим органом функцій вторинного елемента електроприводу, інструменту і вала з опорами призводить до зменшення кількості деталей, маси, вартості тощо.

На рис. 1. показано експериментальну установку верстата для різання монокристалів з КРО без механічних опор, який є різальним інструментом - алмазним кругом із внутрішньою різальною алмазною кромкою, вторинним

елементом асинхронного електродвигуна й утримується у просторі електродинамічними рушійними силами та газодинамічними силами розганяючихся повітряних потоків. Для дослідження механічних характеристик безконтактного приводу і стійкості руху його КРО під час реалізації технологічного процесу різання монокристалів було розроблено двокомпонентний і двовісний динамометр, також показаний на рис. 1 [7].

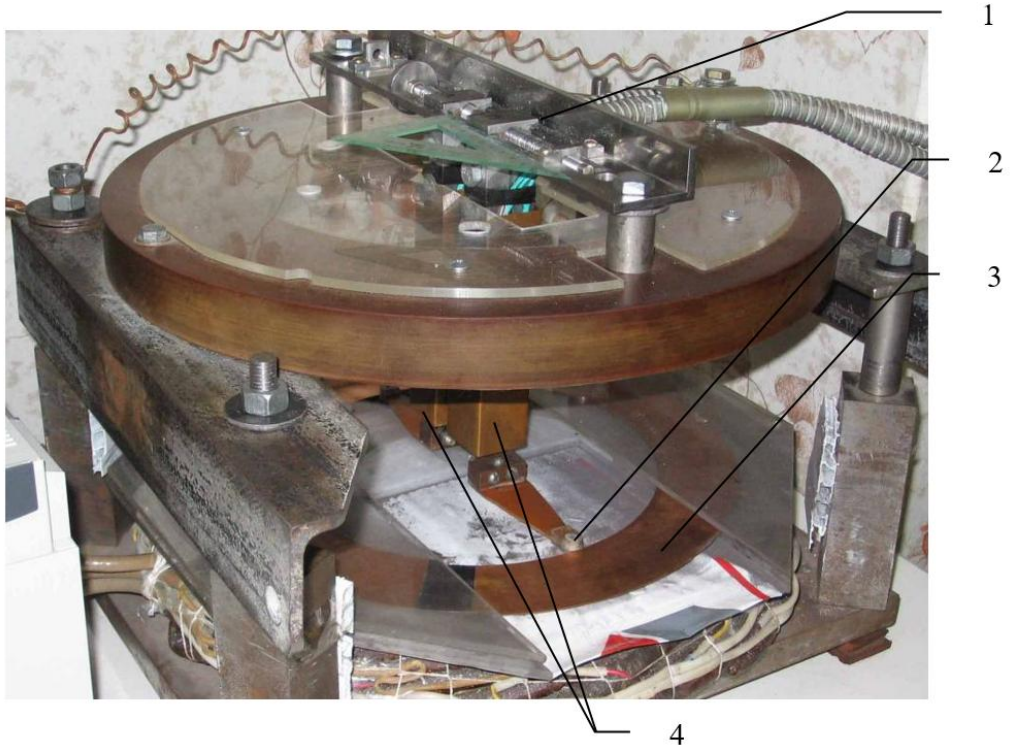


Рис. 1. Експериментальна установка верстата різання монокристалів із КРО без механічних опор із динамометром для дослідження характеристик

1 - гвинтова пара динамометра, що регулює навантаження; 2 - наконечник чутливого елемента динамометра; 3 - КРО без механічних опор; 4 - правий і лівий чутливі елементи динамометра, що вимірюють сили в окружному і радіальному напрямках.

Застосування інструменту без механічних опор у верстатах різання напівпровідникових матеріалів кардинально змінює їхню конструкцію - мідне кільце (КРО) стає єдиною обертовою деталлю, яка приблизно в 100 разів легша за аналогічний обертовий вузол у верстатах різання традиційних конструкцій із натяжним пристроєм для алмазного круга з внутрішньою різальною кромкою (АКВР). Для порівняння на рис. 2 показано робочі органи з АКВР наявних верстатів різання напівпровідникових монокристалів 1 і КРО без механічних опор 2, які виконують аналогічну роботу з розрізання монокристалів на пластини або заготовки [7].

У результаті математичного моделювання процесу руху КРО і на основі теорії про стійкість руху А.М. Ляпунова [16, 17] було аналітичним шляхом отримано критерій асимптотичної стійкості руху КРО в безконтактному приводі [7].

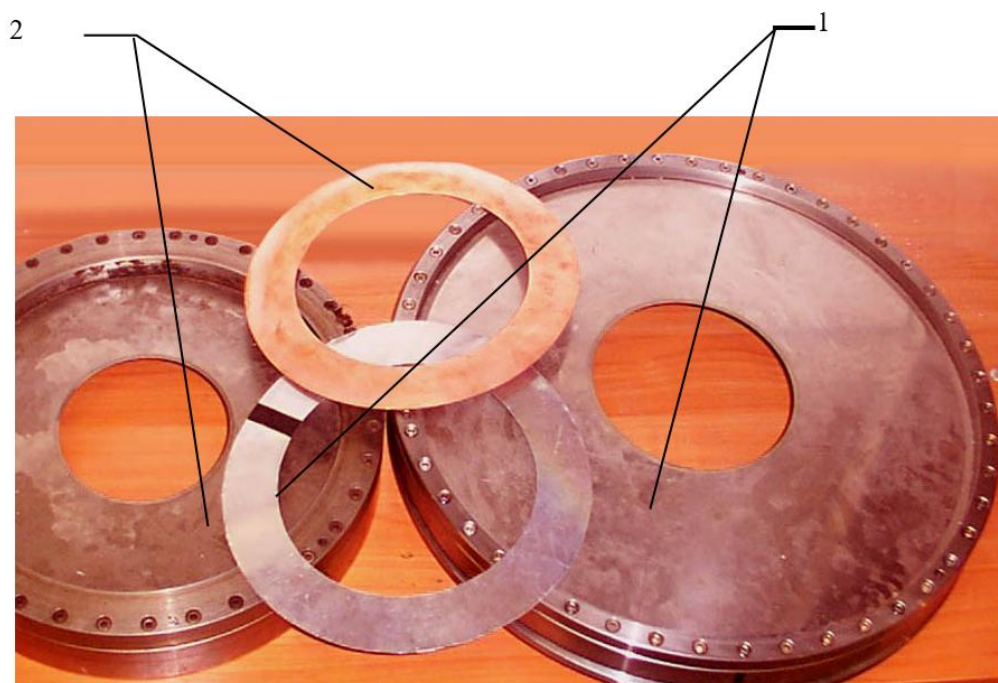


Рис. 2. Робочі органи верстатів різання традиційної і нової конструкції з безконтактним приводом в обертання

1 - АКВР з натяжним пристроєм традиційної конструкції; 2 - алмазний інструмент без механічних опор і безконтактним приводом в обертальний рух.

$$\frac{D_r \sqrt{m}}{V \sqrt{D_r}} < 1, \quad (1)$$

де V – параметр, який визначає в'язкий опір середовища, в якому відбувається рух КРО $\left[\frac{H \cdot c}{m} \right]$;

D_r – жорсткість безконтактної опори КРО в радіальному напрямку $\left[\frac{H}{m} \right]$, яка визначається пружною відновлювальною силою (радіальною);

D_τ – жорсткість безконтактної опори $\left[\frac{H}{m} \right]$ в тангенційному напрямку;

m – маса КРО з розмірністю $[kg]$ або $\left[\frac{H \cdot c^2}{m} \right]$.

Суть отриманого аналітичного критерію полягає у визначенні співвідношення між силовими, інерційними, конструктивними та технологічними параметрами, які:

- закладаються за величиною варіювання під час проектування приводу;
- досить легко вимірюються і регулюються в процесі експлуатації;
- своїм співвідношенням визначають параметричну область стійкості руху за відсутності механічного контакту;
- дають змогу швидко (без отримання розв'язків диференціальних рівнянь) і доволі надійно (що перевірено численними розрахунками та дослідями)

визначити можливість і параметричні межі переналаштування або модернізації приводу за виконання умови його динамічної стійкості.

Стійкість руху розглядалася як результат дії рушійних сил, що створюють обертання КРО у в'язкому середовищі, і оцінювалася відповідно до (1).

Адекватність критерію стійкості перевірено експериментально (див. рис. 1) і математичним моделюванням із розрахунком траєкторій стійкого (за виконання критерію) і нестійкого руху (за невідповідності критерію 1), що показано відповідно на рис. 3 і 4 [7].

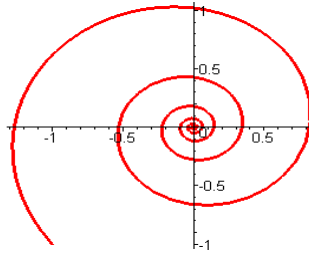


Рис. 3. Стійкий рух А – центру мас КРО

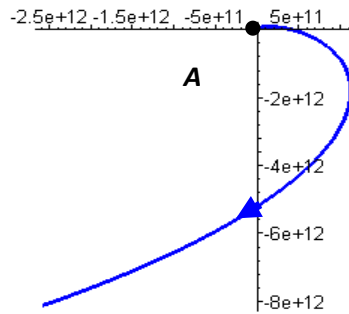


Рис. 4. Нестійкий рух А – центру мас КРО

При цьому чисельно розв'язували систему диференціальних рівнянь, що описує плоско-паралельний рух центру мас КРО:

$$\begin{cases} x'' + vx' = -ax - by \\ y'' + vy' = bx - ay \end{cases} \quad (2)$$

де $D_r/m = a$, $D_\tau/m = b$, $V/m = v$, $D_r/m = a$, $V/m = v$.

Характеристичне рівняння системи (2):

$$\begin{aligned} k^4 + 2vk^3 + (2a + v^2)k^2 + 2avk + a^2 + b^2 &= 0 \\ k^4 + 2vk^3 + (2a + v^2)k^2 + 2avk + a^2 + b^2 &= 0 \end{aligned}$$

має корені:

$$k_1 = -\frac{1}{2}v + \frac{1}{2}\sqrt{v^2 - 4a + 4ib};$$

$$k_2 = -\frac{1}{2}v - \frac{1}{2}\sqrt{v^2 - 4a + 4Ib};$$

$$k_3 = -\frac{1}{2}v + \frac{1}{2}\sqrt{v^2 - 4a - 4Ib};$$

$$k_4 = -\frac{1}{2}v - \frac{1}{2}\sqrt{v^2 - 4a - 4Ib}$$

Загальне рішення (2) в параметричному вигляді відносно $x(t)$ має вигляд :

$$x(t) = e^{(\operatorname{Re}k_{1,2} \cdot t)} (C_1 \sin(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t) + C_2 \cos(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t)) +$$

$$+ e^{(\operatorname{Re}k_{3,4} \cdot t)} (C_3 \sin(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t) + C_4 \cos(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t)).$$

Загальне рішення систем рівнянь (2) відносно $y(t)$:

$$y(t) = -(a(e^{(\operatorname{Re}k_{1,2} \cdot t)} (C_1 \sin(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t) + C_2 \cos(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t)) +$$

$$+ e^{(\operatorname{Re}k_{3,4} \cdot t)} (C_3 \sin(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t) + C_4 \cos(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t))) +$$

$$+ (\operatorname{Re}k_{1,2})^2 e^{(\operatorname{Re}k_{1,2} \cdot t)} (C_1 \sin(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t) + C_2 \cos(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t)) +$$

$$+ 2 \operatorname{Re}k_{1,2} e^{(\operatorname{Re}k_{1,2} \cdot t)} (C_1 \cos(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t) \operatorname{Im}k_{1,2} - C_2 \sin(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t) \operatorname{Im}k_{1,2}) +$$

$$+ e^{(\operatorname{Re}k_{1,2} \cdot t)} (-C_1 \sin(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t) (\operatorname{Im}k_{1,2})^2 - C_2 \cos(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t) (\operatorname{Im}k_{1,2})^2) +$$

$$+ (\operatorname{Re}k_{3,4})^2 e^{(\operatorname{Re}k_{3,4} \cdot t)} (C_3 \sin(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t) + C_4 \cos(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t)) +$$

$$+ 2 \operatorname{Re}k_{3,4} e^{(\operatorname{Re}k_{3,4} \cdot t)} (C_3 \cos(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t) \operatorname{Im}k_{3,4} - C_4 \sin(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t) \operatorname{Im}k_{3,4}) +$$

$$+ e^{(\operatorname{Re}k_{3,4} \cdot t)} (-C_3 \sin(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t) (\operatorname{Im}k_{3,4})^2 - C_4 \cos(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t) (\operatorname{Im}k_{3,4})^2) +$$

$$+ v(\operatorname{Re}k_{1,2} \cdot e^{(\operatorname{Re}k_{1,2} \cdot t)} (C_1 \sin(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t) + C_2 \cos(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t)) +$$

$$+ e^{(\operatorname{Re}k_{1,2} \cdot t)} (C_1 \cos(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t) \operatorname{Im}k_{1,2} - C_2 \sin(\operatorname{Im}k_{1,2} \cdot t) \operatorname{Im}k_{1,2}) +$$

$$+ \operatorname{Re}k_{3,4} \cdot e^{(\operatorname{Re}k_{3,4} \cdot t)} (C_3 \sin(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t) + C_4 \cos(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t)) +$$

$$+ e^{(\operatorname{Re}k_{3,4} \cdot t)} (C_3 \cos(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t) \operatorname{Im}k_{3,4} - C_4 \sin(\operatorname{Im}k_{3,4} \cdot t) \operatorname{Im}k_{3,4}))/b.$$

У дослідженнях [4 - 15] не акцентувалася увага на виборі типу опор - з газовим або рідинним змащенням. У більшості випадків розглядався комбінований тип опори, наприклад, такий, що поєднує електромагнітну та гідродинамічну опори не типової конструкції. Безконтактні опори для КРО як окремого елемента конструкції не проектували, тому критерій (1) не містить реакції опор і не може використовуватися для оцінювання стійкості вала на аеростатичних або інших типових опорах.

У роботах [4, 18, 19] запропоновано конструкцію та виконано дослідження відцентрово-вихрового насоса з безконтактним приводом робочого колеса. Насос не має вала з підшипниками та ущільнень на рухомих поверхнях, тому характеризується максимальним рівнем герметичності, а, отже, і безпеки під час роботи з небезпечними рідинами. У його конструкції використовується комбінована опора - у радіальному напрямку стійкість забезпечують електродинамічні сили, а в осьовому - гідродинамічні, що виникають від потоку робочої рідини. Збільшення надійності та довговічності насоса зумовлено обертанням тільки однієї деталі - робочого колеса, відсутністю механічного контакту з корпусом під час обертання в потоці рідини. Простота конструкції забезпечує зменшення в 1.2...1.5 рази маси і габаритних розмірів насоса, значне зниження собівартості та експлуатаційних витрат. На рис. 5 показано насос у

розрізі з напрямками руху рідини, а на рис. 6 - його статор, який формує електромагнітне поле, що обертається, для створення системи рушійних сил на КРО насоса, що одночасно приводить його до обертання та утримує в робочому просторі при функціонуванні.

На цих самих принципах можна розробити конструкцію відцентрового компресора, робоче колесо якого буде спливати в потоці перекачуваного газу, але забезпечення стійкості обертання буде ускладнюватися малою в'язкістю середовища, що перекачується. Згідно з (1) стійкість зростає зі збільшенням параметра V , що визначає в'язкий опір середовища, тому мала в'язкість газового мастила знижує стійкість руху, хоча й забезпечує зменшення втрат на тертя.

Найбільш широко поширеними машинами, що використовують безконтактний привід прямої дії, є високошвидкісні електро- і пневмошпинделі на аеростатичних опорах для внутрішнього шліфування, фрезерування, скрайбування. В ЕНІМС [20] і науковій лабораторії високошвидкісних пневматичних машин КнАДТУ розроблено модельні ряди пневмошпинделів для застосування в машинобудуванні. Типова конструкція високошвидкісного пневмошпинделя на аеростатичних опорах із приводом від газової турбіни (модель А150/300 ЕНІМС) показана на рис. 7, а його 3D модель у розрізі на рис. 8.

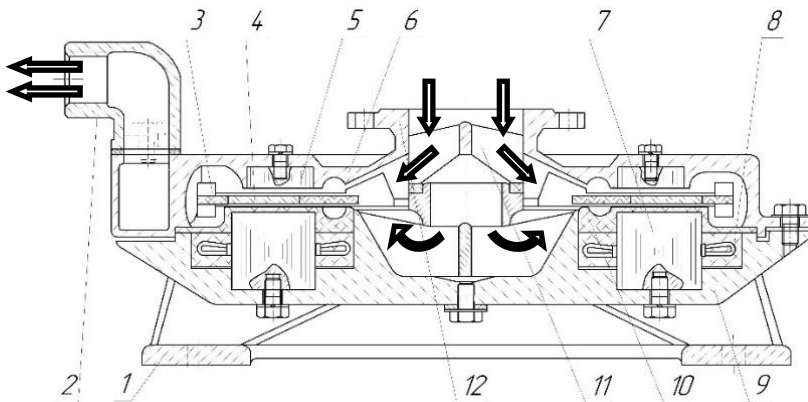


Рис. 5. Відцентрово-вихровий насос КРО (робочим колесом) без механічних опор

Вал із закріпленим інструментом (шліфувальним кругом) приводиться в обертання повітряною турбіною, а утримується в потоці повітряного мастила парою радіальних підшипників, з двома лініями наддуву кожен, і двостороннім під'ятником. Таким чином, забезпечується повна відсутність механічного контакту вала з нерухомими деталями. Така конструкція є найпоширенішою і забезпечує високі частоти обертання - до 150000 об/хв і більше, при цьому в кілька разів знижується рівень вібрацій. Опори на газовому мастилі мають пружні властивості, що дає змогу проходити критичні частоти з жорстким валом, працювати в широкому діапазоні температур. М'якість механічної характеристики пневмошпинделів $M = f(n)$ – залежності обертального моменту на валу M від частоти обертання n , долається встановленням двоступеневих турбін, збільшенням тиску газу на вході в турбіну і його регулюванням.

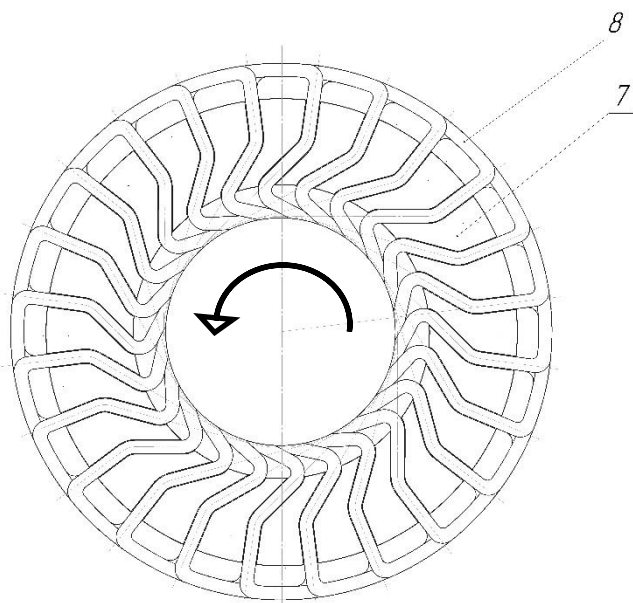


Рис. 6. Статор відцентрово-вихрового насоса - джерело обертового електромагнітного поля, нерівномірне в радіальному напрямку.

1 - кріплення корпусу насоса для його встановлення (монтажу); 2 - горловина на виході рідини з насоса з тиском нагнітання; 3 - робоче колесо з лопатками вихрової та відцентрової частин, розділеними мідним сердечником; 4 - мідна кільцева пластина (вторинний елемент асинхронного електродвигуна), що є сердечником робочого колеса насоса; 5 - магнітопровід неактивного типу; 6 - кришка насоса; 7 - активний магнітопровід (статор з електричними обмотками); 8 - трифазні електричні обмотки; 9 - корпус насоса; 10 - полімерна кільцева вставка, що ізолює обмотки і статор; 11 - направляючий апарат для вхідного потоку рідини; 12 - вхідний патрубок із фланцем.

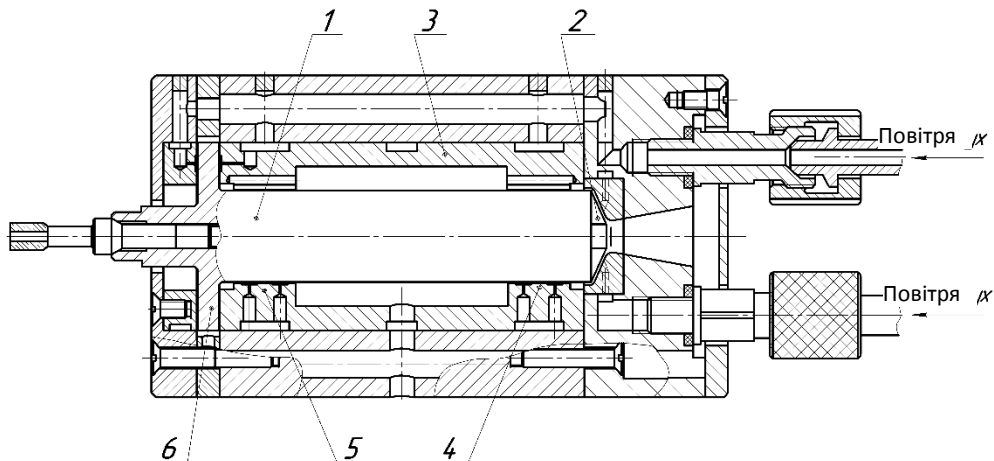


Рис. 7. Пневмошпindel високошвидкісний на аеростатичних опорах
1 - вал; 2 - газова турбіна приводу; 3 - підшипниковий блок; 4, 5 - радіальні газостатичні підшипники; 6 - п'ята двостороннього упорного газостатичного підшипника.

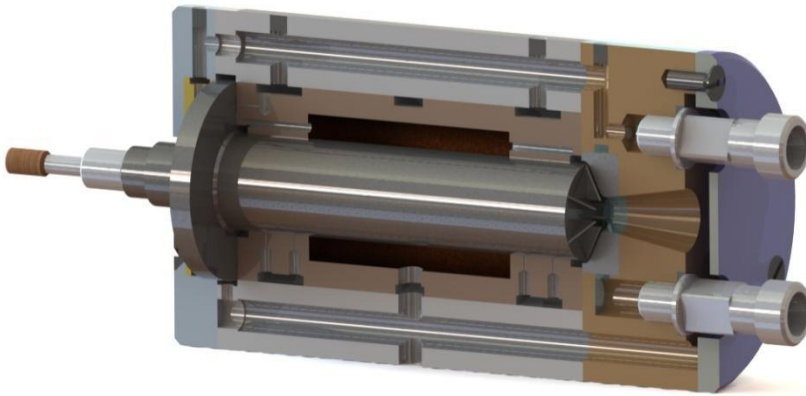


Рис. 8. 3D модель високошвидкісного пневмошпинделя

Для забезпечення мікрометричної точності верстатів шліфувальної групи як опори використовують газостатичні підшипники, що дає змогу, як порівняти з іншими опорами, одержати переваги в скороченні часу виходу на робочий режим із кількох годин до кількох хвилин (наслідок мінімального тепловідлення в газових опорах), у зниженні зносу інструменту (наслідок точності та стабільності позиціонування, ефекту вібропоглинання) [21]. Шпинделі моделей АС і СФС на аеростатичних опорах потужністю від 0,18 кВт до 0,8 кВт, які випускає АМО "ЗИЛ", приводять в обертання від асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, що напресований на вал, який утримують два радіальні підшипники та підп'ятник із змащенням стисненим повітрям. Частота обертання вала варіюється від 15 000 до 100 000 об/хв., забезпечуючи плавне, точне і безвібраційне обертання інструменту. Такі шпинделі застосовують як головний привід верстатів для свердління і фрезерування плат друкованого монтажу, де потрібна висока точність позиціонування і стабільно малі похибки.

Високошвидкісні турбокомпресори та мікротурбінні генератори на опорах із рідинним або газовим змащенням також є безконтактними приводами. У мікротурбінному генераторі МТГ100 (ТОВ "НТЦ Мікротурбінні технології" [22]) високошвидкісний вал утримується на газодинамічних підшипниках і передає крутний момент від колеса газової турбіни до колеса компресора, а також короткозамкненого ротора генератора (Рис. 9).

Безконтактний характер передавання потужності та розподіл її тільки в межах вала дає змогу мінімізувати непродуктивні втрати мікротурбінного генератора. Паливо (Т) надходить у камеру згоряння (КС), а після неї продукти горіння створюють крутний момент на колесі газової турбіни (ГТ), яка обертає вал із закріпленими на ньому колесом відцентрового компресора (ЦК) і ротором електрогенератора (Г) із силовим блоком (БС), а для отримання теплової енергії використовується котел-утилізатор (К) із водяним теплоносієм (В). Конструкція мікротурбінного генератора (твердотільна модель у розрізі) МТГ100 показана на рис. 10.

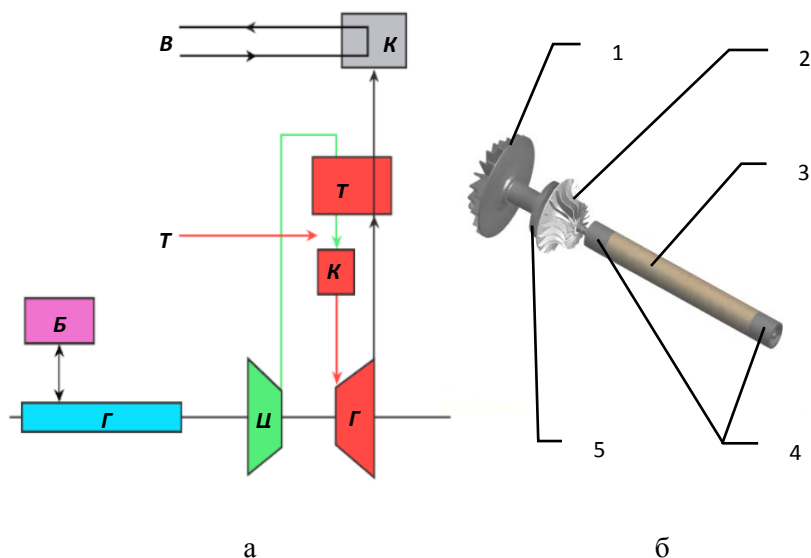


Рис. 9. Принцип дії (а) та модель валу (б) мікротурбінного генератора МТГ100
 1 - колесо газової турбіни; 2 - робоче колесо відцентрового компресора; 3 - ротор електрогенератора; 4 - радіальні підшипники з газовим змащенням; 5 - подвійний підп'ятник із газовим змащенням.

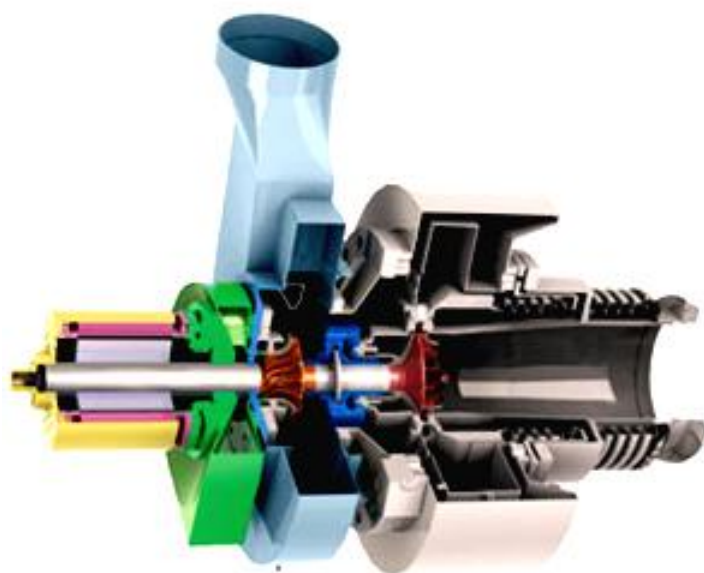


Рис. 10. Мікротурбінний генератор

З огляду на те, що вал утримується двома радіальними і одним напольгливим газодинамічними підшипниками, під час роботи деталі турбінного агрегату, що обертаються, не мають механічного контакту з корпусом. Внаслідок цього знижуються вібрації, знос і значно підвищується ресурс турбогенератора без капітального ремонту (40000 год). Малі втрати на

тертя і пружні властивості газового мастила опор дають змогу проходити критичні частоти обертання, зберігаючи стійкість руху [20], працювати на високій частоті обертання (60000 об/хв), одержувати максимальні ККД для цього типу агрегатів (32% - ККД електрогенерації і 75% - повний ККД). Передача енергії від турбінного колеса до колеса компресора і основної її частини (близько 110 кВт) на ротор генератора, тобто перетворення в енергію тиску на компресорі та електроенергію на генераторі відбуваються без проміжних ланок і механічних передач. Це знижує втрати, масу і габарити, віброактивність, підвищує надійність турбогенераторних машин [20].

Якщо в попередніх прикладах акцентувалася увага на таких перевагах безконтактного приводу, як простота конструкції, надійність, економічність, стійкість роботи на високошвидкісних режимах, то використання безконтактного приводу з аеростатичною опорою в механізмах точного позиціонування зумовлено отриманням рівномірного (плавного) руху з максимальною точністю позиціонування виконавчого органу.

У лабораторії АМФОРА розроблено високоточний двокоординатний стіл (рис.11, а), у якому використовують безконтактний привід із магнітною гвинтовою передачею. За принципом дії вона аналогічна кульково-гвинтовій парі (рис. 11, б), але не має проміжних тіл кочення, тому має переваги як у точності позиціонування, так і плавності руху, зважаючи на відсутність контактної взаємодії (тертя і деформування) між твердими тілами деталей.

У безконтактному приводі координатного столу гвинт і гайка перебувають в аеростатичному відносному ковзанні завдяки подачі в зазор між ними повітря.

При цьому гребінь різьби гайки утримується навпроти гребеня різьби гвинта відносно великими латеральними силами магнітного зв'язку [23].

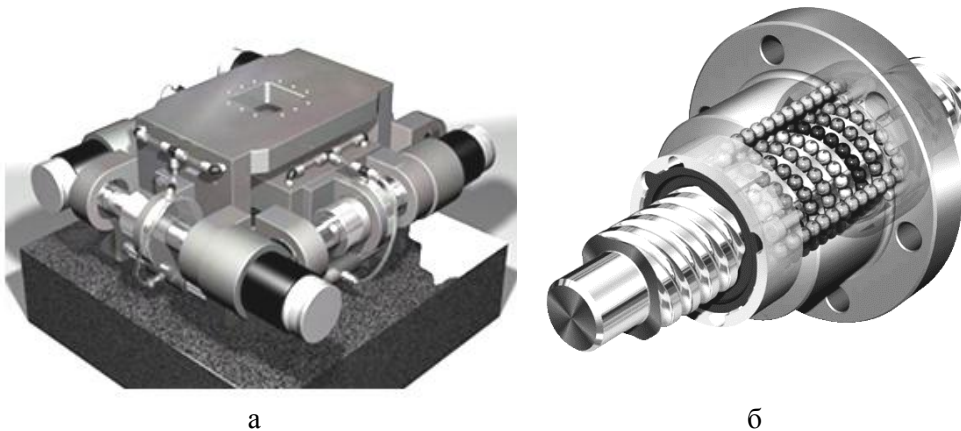


Рис. 11. Двокоординатний стіл переміщень із безконтактним приводом (а) і прецизійна шарико-гвинтова пара (б)

Надвисока точність - до 0,1 нм, достатні жорсткості в різних напрямках - від 400 до 2400 Н/мкм і швидкості переміщень - до 10 мм/с отримані завдяки використанню в двокоординатному столі таких переваг безконтактного переміщення:

- Властивість усереднення положення і самоцентрування вала (гвинта) в

потоці газового мастила, що призводить до нівелювання впливу шорсткостей поверхонь, розділених газом. Нівелюються також відхилення геометричних форм (від циліндричності, круглості, площинності), зумовлені похибками виготовлення деталей, що дає змогу збільшити точність руху і позиціонування, перейти з мікрометричного рівня точності до нанометричного.

- Відсутність люфтів (механічного гістерезису), а також зони нечутливості в приводі, характерних для передач із механічним контактом між деталями через проміжні тіла кочення або без них.

- Відсутність відносно великих деформацій, характерних для локальних ділянок концентрації напружень під час механічного контакту (куля - площина тощо), оскільки дія газодинамічних сил більш рівномірно розподілена поверхнею, а магнітних - об'ємом твердих тіл.

- Висока плавність повільного переміщення і початку руху в безконтактному приводі, оскільки всім найдосконалішим напрямним із механічним контактом, таким як прецизійні кулько-гвинтові пари, властиві "мікроривки". Будь-яка механічна передача на початку руху вимагає великих зусиль через перевищення сили тертя спокою над силою тертя кочення або ковзання.

Конструктивно-технологічною особливістю машин, у яких використовуються опори ковзання на газовому змащенні (а так само і на рідинному) є необхідність у кожному випадку конструювати кожну опору та виготовляти разом із виробом, а не підбирати зі стандартної низки, як підшипники кочення. Тому конструктор має можливість розробляти опори безпосередньо під параметри нового виробу, отримуючи при цьому унікальні якості та нові конструктивні рішення. Саме безконтактні опори дають змогу вільніше варіювати формою та розмірами опорних несучих поверхонь (для отримання заданої рухливості та напрямку реакцій, досягнення необхідного співвідношення між радіальними та осьовими жорсткостями), задавати та навіть регулювати пружні властивості та несучу здатність привода, змінювати його власні частоти коливань тощо.

Відомо, що опори з газовим змащенням можуть мати плоску, циліндричну, конічну або сферичну форми опорних поверхонь [23], однак, у літературі не знайшли належного відображення ті переваги, що дає використання сферичних і, особливо, конічних поверхонь в аеростатичних опорах [24, 25, 26]. Недостатньо досліджено питання розрахунку опорних систем із конічними радіально-упорними підшипниками, у яких у широкому діапазоні варіюється кут нахилу несучих поверхонь. У роботах [21, 27] обґрунтовано перспективність застосування шпинделів на газостатичних опорах для високошвидкісного оброблення металів різанням. Висока відносна швидкість різця і заготовки знижує потужність різання, підвищує продуктивність обробки інструментальних сталей приблизно в 3 рази, а алюмінієвих сплавів - до 10 разів. При цьому головними проблемами залишаються відносно мала жорсткість і несуча здатність опор на газовому мастилi.

У [28] було запропоновано конструкцію шпиндельного вузла з чотирма радіальними та однією осьовою опорами типу під'ятник (рис. 12, а) та показано, що регулювання жорсткості основних і додаткових підшипників дає змогу проходити критичні частоти обертання без втрати стійкості.

Перехід у даній конструкції від радіальних аеростатичних підшипників до радіально-упорних із конічними поверхнями [29] (рис. 12, б) збільшує осьову

стійкість і жорсткість, дає змогу регулювати величину зазору з газовим змащуванням, а, отже, у більшому діапазоні змінювати жорсткість, власні частоти коливань і несучу здатність усього шпindelного вузла.

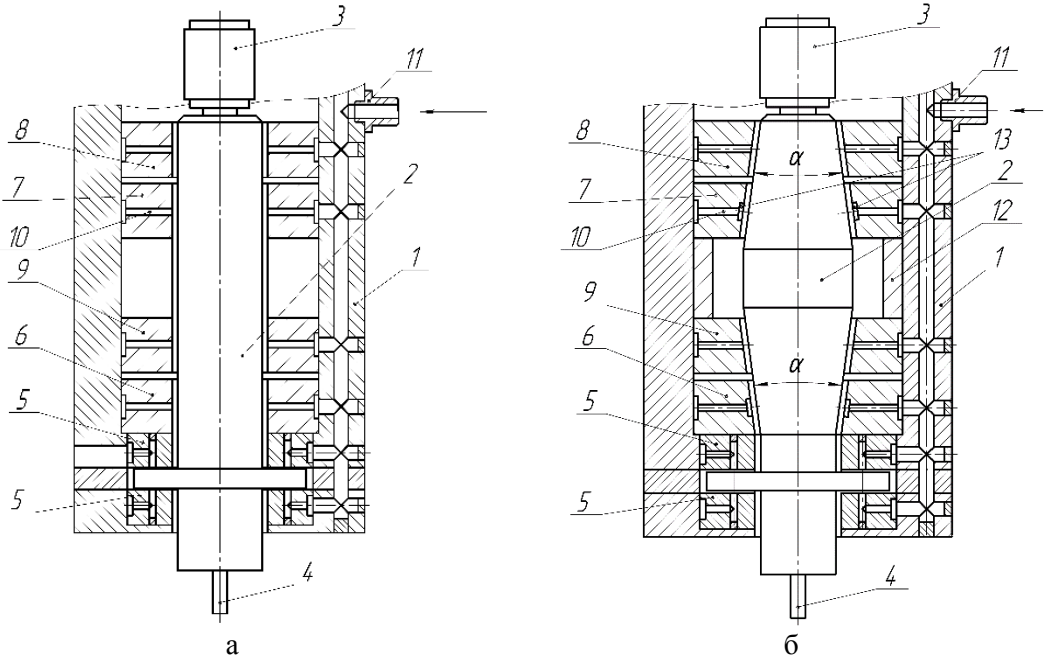


Рис. 12. Шпindelні вузли з радіальними (а) і радіально-упорними конічними (б) газостатичними підшипниками

1- корпус; 2 - вал; 3 - ротор електроприводу; 4 - робочий орган; 5 - під'ятники; 6, 7, 8, 9 - аеростатичні підшипники з газовим мастилом; 10 - живильники; 11 - штуцер для подачі стисненого повітря; 12 - кільце для регулювання величини зазорів у підшипниках; 13 - кільцеве заглиблення ("кишеня").

Застосування аеростатичних опор у шпindelях малої потужності (до 3 кВт) за одночасного збільшення діаметра і площі опорних поверхонь (що легко можна реалізувати для газових опор і практично неможливо для опор кочення), може забезпечити такі техніко-технологічні переваги шпindelів на аеростатичних опорах:

- точність обертання (положення осі обертання) на рівні 0,02...0,04 мкм [30] на сталих режимах навантаження;

- збереження параметрів точності позиціонування вала протягом усього часу експлуатації шпинделя; для порівняння - підшипники кочення втрачають параметри точності через зношування за 1000...2000 годин роботи [30], а найдосконаліші підшипники кочення з керамічними тілами обертання мають задекларований ресурс роботи з прецизійною точністю від 8 000 до 12 000 годин;

- демпфувальні якості опор із газовим мастилом, а також можливість їх регулювання в багатоопорних системах шпindelів [28, 29], дають змогу "жорстким" роторам проходити критичні частоти обертання і досягати частот до 150 000 об/хв і більше;

- демпферні властивості газового мастила роблять опори і приводи не віброактивними, а вібрації, що виникають від зовнішніх, наприклад,

технологічних сил під час різання, гасяться опорами з огляду на відсутність твердотілого механічного контакту в них;

- малі втрати на тертя в опорах порівняно з опорами кочення з рідинним мастилом [31, 32], тому вони не потребують спеціальних засобів охолодження опор, наприклад, масляним туманом, а також додаткового часу для виходу на робочий режим (для вирівнювання температурних полів і полів деформацій).

Відомі також технічні переваги безконтактних приводів на аеростатичних опорах, які не мають актуальності для шпинделів високошвидкісних металообробних верстатів, але є важливими для машин іншого призначення (турбодетандерів, газотурбінних двигунів, насосного обладнання атомних станцій), а саме:

- стійка робота опор на газовому мастилі в умовах наднизьких - криогенних температур (у [31] наведено приклад турбодетандера, що працює за умови $T=13...50\text{ K}$ з частотою обертання $n = 350\ 000\text{ об/хв}$);

- надійне функціонування опор за високих температур - до 5000 C і більше, за значних градієнтів температур через слабку залежність динамічної в'язкості газів від температури [20, 32];

- хімічна стабільність газового мастила при впливі температур, електромагнітних полів і випромінювань, агресивних середовищ, плюс можливість використовувати хімічно нейтральний газ, наприклад, азот;

- відсутність кавітації, а отже, можливість роботи в середовищі з розрядженням і/або у вакуумі [32].

Для подальшого технічного вдосконалення приводів, найповнішої реалізації перерахованих вище переваг слід не обмежуватися дослідженням властивостей аеростатичних опор, а вивчати й проєктувати безконтактний привід як єдину регульовану механічну систему, що регулюється [15].

Газодинамічні процеси в опорах приводу, приладах і пристроях треба зіставити з динамічними процесами різної фізичної природи, наприклад, динамікою і міцністю твердих тіл, термодинамікою, електродинамікою електроприводів, стійкістю коливальних рухів роторів та іншими. Отже, математичний опис динамічних процесів та їхнє експериментальне дослідження мають бути також зіставлені, корелюватися з аспектами конструкторського, технологічного опрацювання і слугувати основою для синтезу безконтактного приводу як єдиної динамічної системи.

Під час визначення напрямів технічного вдосконалення приводів на аеростатичних опорах необхідно максимально використати наявні переваги та особливості опор із газовим змащенням.

По-перше, вони є найбільш високошвидкісними, можуть працювати в режимі підвісу, в широкому діапазоні температур довкілля і газового змащення, мають мінімальні втрати на тертя і високий технічний ресурс.

По-друге, опори з газовим змащенням, на відміну від опор кочення, проєктуються спільно з приводом, тому їхні конструктивні параметри від самого початку дискретно не визначено, немає і суворої їхньої типової градації.

По-третє, аеростатичні опори можуть регулюватися, наприклад, за тиском наддуву, але найбільшою мірою параметри і характеристики опор залежать від величини середнього зазору з газовим мастилом.

По-четверте, газове мастило дає змогу нівелювати відхилення форми та розмірів опорних поверхонь і домогтися на сталих режимах мікрометричної точності позиціонування (з урахуванням биття) і мікрометричної чутливості до

зміни ексцентриситету. Остання якість визначає існування жорсткості опор із газовим (і рідинним) мастилом на мікрометричному рівні, що практично недосяжно для опор кочення. З цієї причини на шпинделях встановлюють по 3-4 прецизійні високошвидкісні шарикопідшипники та здійснюють їхнє підтискання (натяг) з урахуванням температурного режиму.

По-п'яте, головну увагу під час проектування аеростатичних опор необхідно приділяти характерним "слабким місцям" приводів на аеростатичних опорах - відносно малій несучій здатності (як порівняти з опорами на рідинному змащуванні та опорами кочення), а також схильності до динамічної нестійкості (коливання типу "пневмомолот" тощо) за умови змінних навантажень і на холодостому ходу.

У найзагальнішому випадку можна визначити такі основні напрямки вдосконалення (модернізації) безконтактних приводів:

1. Модернізація конструкції його вузлів або структурних компонентів, наприклад, кожної з аеростатичних опор, вала, турбіни, робочого або виконавчого органу.

2. Модернізація конструкції всього приводу - визначення розмірів і взаємного розташування та впливу вузлів або структурних компонентів у складі єдиної механічної системи приводу.

3. Розроблення способів і розширення діапазонів регулювання вихідних параметрів і характеристик, а також параметрів, що визначають статичну і динамічну стійкість.

4. Дослідження і налагодження приводу як єдиної механічної системи. Воно ґрунтується на регулюванні параметрів опор, зміні конструкцій вала й опорної системи (за розмірами, типом і розташуванням опор тощо), робочих органів та інструменту, зміні режимів технологічних процесів, що реалізуються. Нині комп'ютерному моделюванню та аналізу (обчислювальному експерименту) можуть бути піддані практично всі наявні фізичні процеси в опорах і приводах, параметричні зв'язки між ними, але, як правило, остаточне налагодження виконується в процесі лабораторних натурних випробувань.

Висновки. Проведено аналіз конструкцій і підходів до проектування безконтактних приводів на опорах із газовим змащенням. Показано, що для подальшого технічного вдосконалення приводів, найповнішої реалізації перерахованих вище переваг слід не обмежуватися дослідженням властивостей аеростатичних опор, а вивчати й проектувати безконтактний привід як єдину регульовану механічну систему, що регулюється.

Обґрунтовано, що застосування аеростатичних опор у шпинделях малої потужності (до 3 кВт) за одночасного збільшення діаметра і площі опорних поверхонь (що легко можна реалізувати для газових опор і практично неможливо для опор кочення), може забезпечити техніко-технологічні переваги шпинделів на аеростатичних опорах такі як: точність обертання; збереження параметрів точності позиціонування вала протягом усього часу експлуатації шпинделя; можливість регулювання жорсткості опор; демпфувальні якості опор; малі втрати на тертя в опорах порівняно з опорами кочення з рідинним мастилом.

Визначено технічні переваги безконтактних приводів на аеростатичних опорах, які не мають актуальності для шпинделів високошвидкісних металообробних верстатів, але є важливими для машин іншого призначення (турбодетандерів, газотурбінних двигунів, насосного обладнання атомних

станцій). До цих переваг відносяться: стійка робота опор на газовому мастилі в умовах наднизьких - криогенних температур; надійне функціонування опор за високих температур - до 5000 С і більше; хімічна стабільність газового мастила при впливі температур, електромагнітних полів і випромінювань, агресивних середовищ; відсутність кавітації.

На основі проведених досліджень визначено напрями технічного вдосконалення (модернізації) приводів на газостатичних опорах, які дозволяють максимально використати наявні переваги та особливості опор із газовим змащенням.

Список літератури

1. Peshti, Yu. V. *Gazovaya smazka* [Tekst] / Yu. V. Peshti: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 1993. – 381s.
2. Павлице, В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин [Текст] / В. Т. Павлице. – Львів: Афіша, 2003. – 560 с.
3. *Teoriya mehanizmov i mashin. Terminologiya* [Tekst]: Ucheb. posob. / N. I. Levitskiy [i dr.]; pod red. K. V. Frolova. – М.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2004. – 80 s.
4. 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. Vol. VIIIA. – Lublin, 2008. – P. 126–133.
5. Nosko, P. Multiparameter synthesis of non-contact machine drive [Text] / P. Nosko, V. Breshev, P. Fil // Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture. Vol. IX. – Lublin, 2009. – P. 172–180.
6. Nosko, P. Structural synthesis and design variants for non-contact machine drives [Text] / P. Nosko, V. Breshev, P. Fil, G. Boyko // Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture. Vol. XB. – Lublin, 2010. – P. 77–86.
7. Брешев, В. Е. Параметричний синтез кільцевих робочих органів без механічних опор для підвищення технічного рівня машин з прямим приводом [Текст]: дис. ... канд. тех. наук : 05.02.02 / В. Є. Брешев – Луганськ: Вид-во СЧУ ім. В. Даля, 2006. – 189 с.
8. Eroshin, S. S. Povyshenie effektivnosti mashin primeneniem rabochih organov bez mehanicheskikh opor [Tekst] / S. S. Eroshin, V. E. Breshev // Vostochno-Evropejskiy zhurnal peredovyh tehnologij. – 2005. – №5(17). – S. 82 – 85.
9. Breshev, V. E. Opredelenie kriteriya ustojchivosti vrasheniya rabochih organov mashin i ego eksperimentalnaya proverka [Tekst] / V. E. Breshev // Vostochno-Evropejskiy zhurnal peredovyh tehnologij. – 2007. – № 4/4 (28). – S. 21–25.
10. 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. Vol. XC. – Lublin, 2010. – P. 209 – 216.
11. Створення конструкції безпосереднього приводу інструмента та робочих органів верстатів с використанням електромагнітних опор [Текст]: Звіт про НТР (заключний) / Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля. – КГН-7-03; – № ДР 0103U008250; Інв. № 0205U000311. – Луганськ, 2004. – 164 с.
12. Breshev, V. E. Opredelenie kriteriya ustojchivosti vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya ispolnitel'nogo organa v beskontaktnom privode [Tekst] / V. E. Breshev // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2010. – № 2(144). – С. 23 – 28.
13. Eroshin, S. S. Eksperimentalnoe issledovanie reakcij svobodnogo kolcevogo rotora na radialnuyu nagruzku [Tekst] / S. S. Eroshin, B. I. Nevzlin, V. E. Breshev // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2005. – № 1(10). – С. 23 – 25.
14. Breshev, V. E. Issledovanie vliyaniya na ustojchivost dvizheniya rabochih organov mashin sposobov prilozheniya vneshnej nagruzki [Tekst] / V. E. Breshev, A. E. Tretyak //

Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2007. – № 2 (15) Ч.ІІ. – С. 10 – 12.

15. Breshev, V. E. Razvitiye tehnologii beskontaknyh opor i perehod k resursosberegayushej tehnologii beskontaknogo privoda [Tekst] / V. E. Breshev, A. V. Breshev // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: 36. наук. пр. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2010. – С. 153 – 159.

16. Lyapunov, A. M. Obshaya zadacha ob ustojchivosti dvizheniya [Tekst] / A. M. Lyapunov. – М.-Л.: Izd-vo tehniko-teoreticheskoy literatury, 1950. – 472 s.

17. Merkin, D. R. Vvedenie v teoriyu ustojchivosti dvizheniya / D. R. Merkin. – 4-e izd. – SPb. : Lan, 2003. – 304 s.

18. Пат. 77529 Україна, МПК H01L 21/461. Пристрій для різання монокристалів на пластини [Текст] / О. Л. Голубенко, С. С. Єрошин, Б. І. Невзлін, В. Є. Брешев; заявник та власник Східноукраїнський національний ун-т ім. В. Даля. – № 20041210091 ; заявл. 08.12.04 ; опубл. 15.12.06, Бюл. № 12. – 4 с.

19. Пат. 90584 Україна, МПК F04D 1/00. Відцентрово-вихровий насос [Текст] / П. Л. Носко, П. В. Філь, В. Є. Брешев, О. П. Карпов; заявник та власник Східноукраїнський національний ун-т ім. В. Даля. – № 200811287 ; заявл. 18.09.08; опубл. 11.05.10, Бюл. № 9. – 4 с.

20. Opyr skolzheniya s gazovoy smazkoj [Tekst] / S. A. Shejnberg [i dr.]; pod red. S. A. Shejnberga. – 2-e izd.: Mashinostroenie, 1979. – 335 s.

21. Kosmynin, A. V. Podshipniki na gazovoy smazke vysokoskorostnyh rotorov [Elektronnyj resurs] : nauchnaya elektronnyaya biblioteka / A. V. Kosmynin, V. S. Vinogradov, V. S. Shetinin, A. V. Smirnov // Sovremennye naukoymkie tehnologii. – 2009. – №1.

22. Mikroturbinnij generator MGT100: ООО NTC Mikroturbinnye tehnologi.23. 41. Magnetostatic Air bearing Nano-precision Long-travel Open loop: AMPHORA Laboratories 2004.

23. Федотов, В. О. Газові підвіси шпindelних вузлів [Текст]: монографія / В. О. Федотов, І. В. Федотова. – Вінниця: Вид-во ВНТУ, 2010. – 244 с.

24. Пат. 98084 Україна, МПК F16C 32/06 (2006. 01). Шпindelний 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.

25. Характеристики конічних підвісів з поздовжніми глухими мікроканавками постійної ширини і різним профілем по глибині [Текст] / В. І. Савуляк, В. О. Федотов, І. В. Віштак, А. М. Соломон // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2019. – № 1. – С. 78-85.

26. Віштак І. В. Вплив східчастих поздовжніх канавок на характеристики радіальних газостатичних опор [Текст] / І. В. Віштак, В. О. Федотов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 5. – С. 110-115.

27. Fedotova I. V. Spindle on the conical gas suspension their design and research performance / I. V. Fedotova, V. I Savulyak // New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies, Tehnomus. Suceava, Romania, 2013. – № 20. – P. 234 – 239.

28. Karpov V. S. Dinamicheskie karakteristiki vertikalnyh gazovyh podshipnikov s profilirovannoj poverhnostyu vala / V. S. Karpov, O. N. Tihonenkova // Issledovanie i primeneniye opor skolzheniya s gazovoy smazkoj : Vsesoyuznoe koordinacionnoe soveshanie, 12 – 14 maya 1983 g. : tezisy dokl. – Vinnica, 1983. – S. 46 – 47.

29. Karpov B. C. Opredeleniye kriticheskikh parametrov cilindricheskikh gazovyh podshipnikov s diskretnym nadduvom / V. S. Karpov, E. G. Grudskaya // Mashinovedeniye. – 1982. – № 6 – S. 15 – 18.

30. Karpov B. C. Vliyanie disbalansa rotora na rabotu sfericheskogo gazovogo podshipnika / V. S. Karpov, L. A. Prokulevich // Mashinovedeniye. – 1980. – № 4. – S. 10 – 12.

31. Podshipniki s gazovoy smazkoj [Tekst] / pod red. N. S. Gressema, Dzh. U. Pauella; per s angl. P. P. Mostovenko [i dr.]: Mir, 1963. – 423 s.

32. Drozdovich, V. N. Gazodinamicheskie podshipniki [Tekst] / V. N. Drozdovich. – L. : Mashinostroenie, 1976. – 208 s.

33. Breshev, V. E. Strukturnij sintez bezkontaktnih privodiv robochih mashin [Tekst] / V. E. Breshev, O. V. Breshev // Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2011. – № 5/3 (53). – S. 6 – 10.

34. Breshev, A. V. Modernizaciya konstrukcii mnogoopornogo beskontaktного привода na aerostaticeskikh podshipnikah [Tekst] / A. V. Breshev, A. P. Karpov, V. E. Breshev // Visnik Shidnoukrayinskogo nacionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalja. – 2012. – № 6(177) – Ch.1. – S. 339 – 344.

35. Breshev, A. V. Modernizaciya odnoopornogo beskontaktного привода dlya uluchsheniya ego tehniceskikh harakteristik [Tekst] / A. V. Breshev // Visnik Shidnoukrayinskogo nacionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalja. – 2013. – № 17 (206) – S. 15 – 21.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2024

Брешев Олексій Володимирович - кандидат технічних наук, докторант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр-т Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: abreshev@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-4176-775X>

Башта Олександр Васильович - кандидат технічних наук, доцент, кафедра прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр-т Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: oleksandr.bashta@npp.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7914-897X>

Носко Павло Леонідович - доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, 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>

Харченко Андрій Ігорович - Здобувач вищої освіти ступеня магістра за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», освітньо-професійна програма «Прикладна механіка, стандартизація та оцінка якості технічних систем», Національний авіаційний університет, проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.. 406-78-42, E-mail: nau12@ukr.net

Герасимов Володимир Олегович - Здобувач вищої освіти ступеня магістра за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», освітньо-професійна програма «Прикладна механіка, стандартизація та оцінка якості технічних систем», Національний авіаційний університет, проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.. 406-78-42, E-mail: nau12@ukr.net

Ладик Антон Дмитрович - Здобувач вищої освіти ступеня магістра за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», освітньо-професійна програма «Прикладна механіка, стандартизація та оцінка якості технічних систем», Національний авіаційний університет, проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.. 406-78-42, E-mail: nau12@ukr.net

O. BRESHEV, O. BASHTA, P. NOSKO, A. KHARCHENKO, V. HERASYMOV, A. LADYK

STRUCTURAL ANALYSIS AND DESIGN APPROACHES FOR A NON-CONTACT ROTATIONAL DRIVE ON GAS-LUBRICATED SUPPORTS AS A SINGLE AND ADJUSTABLE DYNAMIC SYSTEM

The paper presents a comparative analysis of the designs of non-contact rotational drives on gas-lubricated bearings used in machines and mechanisms for various purposes, such as microturbine generators, two-axis displacement tables, pneumatic spindles, and single-crystal cutting machines. The technical and technological advantages of non-contact direct rotational drives with gas-lubricated bearings are shown; the use of a non-contact drive with an aerostatic bearing in precision positioning mechanisms results in a uniform (smooth) movement with maximum positioning accuracy of the actuator. The approaches to designing the drive as a single and adjustable dynamic system, the characteristics of which are established and adjusted by changing the design, technological parameters, and adjusting the aerostatic supports, are considered. Based on the research, the directions of technical improvement of drives on gas-lubricated supports which allow to maximize the existing advantages and features of gas-lubricated supports are outlined.

Keywords: non-contact drive, gas-lubricated bearings, drive design, aerostatic bearings, dynamic system

References

1. Peshti, Yu. V. Gazovaya smazka [Tekst] / Yu. V. Peshti: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 1993. – 381s.
2. Pavlyshche, V. T. Osnovy konstruiuvannia ta rozrakhunok detalei mashyn [Tekst] / V. T. Pavlyshche. – Lviv: Afisha, 2003. – 560 s.
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 s.
4. 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. Vol. VIIIA. – Lublin, 2008. – R. 126–133.
5. Nosko, P. Multiparameter synthesis of non-contact machine drive [Text] / P. Nosko, V. Breshev, P. Fil // Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture. Vol. IX. – Lublin, 2009. – R. 172–180.
6. Nosko, P. Structural synthesis and design variants for non-contact machine drives [Text] / P. Nosko, V. Breshev, P. Fil, G. Boyko // Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture. Vol. XV. – Lublin, 2010. – R. 77–86.
7. Breshev, V. E. Parametrychnyi syntezy kiltsevykh robochykh orhaniv bez mekhanichnykh opor dlia pidvyshchennia tekhnichnoho rivnia mashyn z priamym pryvodom [Tekst]: dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.02.02 / V. Ye. Breshev – Luhansk: Vyd-vo SNU im. V. Dalia, 2006. – 189 s.
8. Eroshin, S. S. Povyshenie effektivnosti mashyn primeneniem rabochnykh organov bez mekhanicheskikh opor [Tekst] / S. S. Eroshin, V. E. Breshev // Vostochno-Evropejskij zhurnalпередovykh tehnologij. – 2005. – №5(17). – S. 82 – 85.
9. Breshev, V. E. Opredelenie kriteriya ustojchivosti vrasheniya rabochnykh organov mashin i ego eksperimentalnaya proverka [Tekst] / V. E. Breshev // Vostochno-Evropejskij zhurnalпередovykh tehnologij. – 2007. – № 4/4 (28). – S. 21–25.
10. 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. Vol. XS. – Lublin, 2010. – R. 209 – 216.
11. Stvorennia konstruksii bezposerednoho pryvodu instrumenta ta robochykh orhaniv verstativ s vykorystanniam elektromahnitnykh opor [Tekst]: Zvit pro NTR (zakliuchnyi) / Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet im. Volodymyra Dalia. – KHN-7-03; – № DR 0103U008250; Inv. № 0205U000311. – Luhansk, 2004. – 164 s.

12. Breshev, V. E. Opredelenie kriteriya ustojchivosti vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya ispolnitelnogo organa v beskontaktnom privode [Tekst] / V. E. Breshev // Visnyk Skhidnoukrajinskoho natsionalnogo universytetu imeni Volodymyra Dalia. – 2010. – № 2(144). – S. 23 – 28.
13. Eroshin, S. S. Eksperimentalnoe issledovanie reakcij svobodnogo kolcevogo rotora na radialnyu nagruzku [Tekst] / S. S. Eroshin, B. I. Nevzlin, V. E. Breshev // Pratsi Luhanskoho viddilennia Mizhnarodnoi Akademii informatyzatsii. – 2005. – № 1(10). – S. 23 – 25.
14. Breshev, V. E. Issledovanie vliyaniya na ustojchivost dvizheniya rabochih organov mashin sposobov prilozheniya vneshnej nagruzki [Tekst] / V. E. Breshev, A. E. Tretyak // Pratsi Luhanskoho viddilennia Mizhnarodnoi Akademii informatyzatsii. – 2007. – № 2 (15) Ch.II. – S. 10 – 12.
15. Breshev, V. E. Razvitie tehnologii beskontaktnyh opor i perehod k resursoberegayushej tehnologii beskontaktnogo privoda [Tekst] / V. E. Breshev, A. V. Breshev // Resursozberihaiuchi tekhnologii vyrobnytstva ta obrobky tyskom materialiv u mashynobuduvanni: Zb. nauk. pr. – Luhansk: Vyd-vo SNU im. V. Dalia, 2010. – S. 153 – 159.
16. Lyapunov, A. M. Obshaya zadacha ob ustojchivosti dvizheniya [Tekst] / A. M. Lyapunov. – M.-L.: Izd-vo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1950. – 472 s.
17. Merkin, D. R. Vvedenie v teoriyu ustojchivosti dvizheniya / D. R. Merkin. – 4-e izd. – SPb. : Lan, 2003. – 304 s.
18. Pat. 77529 Ukraina, MPK H01L 21/461. Prystrii dlia rizannia monokystaliv na plastyny [Tekst] / O. L. Holubenko, S. S. Yeroshyn, B. I. Nevzlin, V. Ye. Breshev; zaiavnyk ta vlasnyk Skhidnoukrajinskyyi natsionalnyi un-t im. V. Dalia. – № 20041210091 ; zaiavl. 08.12.04 ; opubl. 15.12.06, Biul. № 12. – 4 s.
19. Pat. 90584 Ukraina, MPK F04D 1/00. Vidtsentrovo-vykhrovyi nasos [Tekst] / P. L. Nosko, P. V. Fil, V. Ye. Breshev, O. P. Karpov; zaiavnyk ta vlasnyk Skhidnoukrajinskyyi natsionalnyi un-t im. V. Dalia. – № 200811287 ; zaiavl. 18.09.08; opubl. 11.05.10, Biul. № 9. – 4 s.
20. Opori skolzheniya s gazovoy smazkoj [Tekst] / S. A. Shejnberg [i dr.]; pod red. S. A. Shejnberga. – 2-e izd.: Mashinostroenie, 1979. – 335 s.
21. Kosmynin, A. V. Podshipniki na gazovoy smazke vysokoskorostnyh rotorov [Elektronnyj resurs] : nauchnaya elektronnaya biblioteka / A. V. Kosmynin, V. S. Vinogradov, V. S. Shetinin, A. V. Smirnov // Sovremennye naukoymkie tehnologii. – 2009. – № 1.
22. Mikroturbinnij generator MGT100: OOO NTC Mikroturbinnye tehnologi.23. 41. Magnetostatic Air bearing Nano-precision Long-travel Open loop: AMPHORA Laboratories 2004.
23. Fedotov, V. O. Hazovi pidvisy shpyndelnykh vuzliv [Tekst]: monohrafiia / V. O. Fedotov, I. V. Fedotova. – Vinnytsia: Vyd-vo VNTU, 2010. – 244 s.
24. Pat. 98084 Ukraina, MPK F16C 32/06 (2006. 01). Shpyndelnyi vuzol z hazovymy oporamy [Tekst] / P. L. Nosko, V. Ye. Breshev, O. V. Breshev; zaiavnyk ta patentovlasnyk Skhidnoukrajinskyyi nats. un-t im. V. Dalia. – № a201106472; zaiavl. 23.05.11; opubl. 10.04.12, Biul. № 7. – 4 s.
25. Kharakterystyky konichnykh pidvisiv z pozdovzhnimy hlukhymy mikrokanavkamy postiinoi shyriny i riznym profilem po hlybini [Tekst] / V. I. Savuliak, V. O. Fedotov, I. V. Vishtak, A. M. Solomon // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu. – 2019. – № 1. – S. 78-85.
26. Vishtak I. V. Vplyv skhidchastykh pozdovzhnykh kanavok na kharakterystyky radialnykh hazostatychnykh opor [Tekst] / I. V. Vishtak, V. O. Fedotov // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu. – 2016. – № 5. – S. 110-115.
27. Fedotova I. V. Spindle on the conical gas suspension their design and research performance / I. V. Fedotova, V. I Savulyak // New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies, Tehnomus. Suceava, Romania, 2013. – № 20. – R. 234 – 239.
28. Karpov V. S. Dinamicheskie karakteristiki vertikalnykh gazovykh podshipnikov s profilirovannoj poverhnostyu vala / V. S. Karpov, O. N. Tihonenkova // Issledovanie i primenenie opor skolzheniya s gazovoy smazkoj : Vsesoyuznoe koordinacionnoe soveshanie,

12 – 14 мая 1983 г. : тезисы докл. – Vinnica, 1983. – S. 46 – 47.

29. Karpov B. C. Opredelenie kriticheskikh parametrov cilindricheskikh gazovykh podshipnikov s diskretnym nadduvom / V. S. Karpov, E. G. Grudskaya // Mashinovedenie. – 1982. – № 6 – S. 15 – 18.

30. Karpov B. C. Vliyanie disbalansa rotora na rabotu sfericheskogo gazovogo podshipnika / V. S. Karpov, L. A. Prokulevich // Mashinovedenie. – 1980. – № 4. – S. 10 – 12.

31. Podshipniki s gazovoj smazkoj [Tekst] / pod red. N. S. Gressema, Dzh. U. Pauella; per s angl. P. P. Mostovenko [i dr.]: Mir, 1963. – 423 s.

32. Drozdovich, V. N. Gazodinamicheskie podshipniki [Tekst] / V. N. Drozdovich. – L. : Mashinostroenie, 1976. – 208 s.

33. Breshev, V. E. Strukturnij sintez bezkontaktnih privodiv robochih mashin [Tekst] / V. E. Breshev, O. V. Breshev // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2011. – № 5/3 (53). – S. 6 – 10.

34. Breshev, A. V. Modernizaciya konstrukcii mnogoopornogo beskontaktного привода na aerostaticeskikh podshipnikah [Tekst] / A. V. Breshev, A. P. Karpov, V. E. Breshev // Visnik Shidnoukrayinskogo nacionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalya. – 2012. – № 6(177) – Ch.1. – S. 339 – 344.

35. Breshev, A. V. Modernizaciya odnoopornogo beskontaktного привода dlya uluchsheniya ego tehniceskikh harakteristik [Tekst] / A. V. Breshev // Visnik Shidnoukrayinskogo nacionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalya. – 2013. – № 17 (206) – S. 15 – 21.

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

Bashta Oleksandr Vasylovych - PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1, Lubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: oleksandr.bashta@npp.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7914-897X>

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

Kharchenko Andrii Ihorovych - Graduate of higher education with a master's degree in specialty 131 «Applied Mechanics», educational and professional program «Applied Mechanics, Standardization and Quality Assessment of Technical Systems», National Aviation University, 1, Lubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, tel. 406-78-42, E-mail: nau12@ukr.net

Herasymov Volodymyr Olehovych - Graduate of higher education with a master's degree in specialty 131 «Applied Mechanics», educational and professional program «Applied Mechanics, Standardization and Quality Assessment of Technical Systems», National Aviation University, 1, Lubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, tel. 406-78-42, E-mail: nau12@ukr.net

Ladyk Anton Dmytrovych - Graduate of higher education with a master's degree in specialty 131 «Applied Mechanics», educational and professional program «Applied Mechanics, Standardization and Quality Assessment of Technical Systems», National Aviation University, 1, Lubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, tel. 406-78-42, E-mail: nau12@ukr.net