

О. В. БРЕШЕВ, О. В. БАШТА, П. Л. НОСКО, О. В. РАДЬКО, В. Б. МЕЛЬНИК

МЕТОДИКА ПРОЄКТУВАННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ПРИВОДУ НА АЕРОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ ЯК ЄДИНОЇ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

У роботі представлено методику та алгоритм проєктування безконтактних приводів на регульованих конічних аеростатичних опорах. Основну увагу приділено структурному синтезу, вибору компоновки та розрахункових схем, а також статичній і динамічній стійкості приводу. Розглянуто конструктивні особливості одноопорних і багатоопорних систем, визначено їх переваги та обмеження. Запропоновано етапи проєктування: від попередніх розрахунків до уточнюючих аналізів із використанням методу кінцевих елементів і комп'ютерного моделювання. Детально описано алгоритм розрахунку опорної системи на задане навантаження з урахуванням жорсткості, вантажопідйомності та витрати повітряного змашення. Методика відпрацьовувалась при модернізації аеростатичного одноопорного пневмошпинделя для верстатів різання монокристалів, при розробці та подальшій модернізації високошвидкісного пневмошпинделя на конічних, регульованих за зазором і різних за своєю геометрією (а також конструкцією) опорах. Проведено модернізацію конструкцій задля підвищення ефективності приводу: зменшення маси, зниження витрат повітря та підвищення надійності. У ході дослідження властивостей та характеристик приводів на регульованих аеростатичних системах, розроблено або уточнено математичні моделі та алгоритми комп'ютерного моделювання. Представлені результати формують основу для впровадження високотехнологічних безконтактних приводів у точних і високошвидкісних технологічних процесах.

Ключові слова: безконтактний привід, аеростатична опора, конічна опора, проєктування, жорсткість, вантажопідйомність, динамічна стійкість, регулювання параметрів

O. BRESHEV, O. BASHTA, P. NOSKO, O. RADKO, V. MELNYK

METHODOLOGY FOR DESIGNING A CONTACTLESS DRIVE ON AEROSTATIC SUPPORTS AS A SINGLE MECHANICAL SYSTEM

The paper presents a methodology and a step-by-step algorithm for designing contactless drives based on adjustable conical aerostatic bearings. It systematically explores the main stages of the design process, including structural synthesis, development of layout and calculation schemes, as well as evaluation of the drive's static and dynamic stability. The study examines both single-support and multi-support configurations, highlighting their respective advantages, limitations, and areas of application. The proposed approach covers the key design stages, including the definition of technical requirements, structural synthesis of the drive, development of design schemes and selection of optimal bearing configurations. Special attention is paid to tapered bearings because of their advantages in reducing overall weight, volume, and air consumption while maintaining sufficient load capacity and rigidity. The design procedures incorporate both analytical methods and finite element modeling for refining structural and performance parameters. The static performance evaluation of the conical support system under specified loads is of special importance. An iterative method is proposed to determine optimal geometrical and technological parameters that meet technical specifications while ensuring sufficient load capacity, rigidity, and air consumption efficiency. The research also addresses dynamic behavior by analyzing critical frequencies and motion stability using computational simulations. The modernization of support structures is emphasized as a crucial step to improve drive performance. This includes reducing the mass of components, optimizing airflow paths, and enhancing overall reliability. Examples of advanced designs for bearings and spindle structures are presented, supported by 3D models and cross-sectional views of implemented concepts. Ultimately, the findings contribute to the advancement of high-speed, lightweight, and energy-efficient contactless drive systems suitable for precision machining and other high-tech industrial applications. The methodology offers a robust foundation for future innovations in the field of non-contact bearing-supported rotary systems.

Keywords: contactless drive, aerostatic bearing, conical support, design methodology, stiffness, load capacity, dynamic stability, parameter adjustment

ВСТУП. При проєктуванні безконтактного приводу на аеростатичних опорах основними параметрами є: діапазон швидкісних режимів, величина та напрямок зовнішніх навантажень при виконанні корисної роботи, необхідна жорсткість опорної системи ротора, вимоги до точності позиціонування ротора, динаміка розгону та гальмування, корисна потужність при реалізації технологічного процесу, режим роботи, розрахунковий технічний ресурс, обмеження за масою, габаритами тощо.

Відповідно, потрібно сформулювати методику проєктування безконтактного приводу на аеростатичних опорах як єдиної механічної системи. Це склало напрямки досліджень, охоплених у роботі.

Аналіз стану питання

Як правило, ключові параметри і характеристики приводу, що розробляється, або машини з цим приводом, закладаються в технічне завдання (ТЗ). Для отримання у проєктованого приводу параметрів і характеристик у заданих ТЗ межах, обґрунтовано кілька напрямків проєктних процедур і досліджень, що поєднують в собі операції аналізу та

синтезу, які розглянуто в основній частині.

Основна частина.

1. Визначення структури приводу та розробка його компоновальної та розрахункової схем [1, 2].

Алгоритм структурного синтезу та основні принципи компоновання та конструювання безконтактних приводів викладено у [3].

Загальну класифікацію безконтактних опор для таких приводів наведено на рис.1. Основними структурними варіантами для безконтактних приводів запропоновано використовувати одноопорні або багатоопорні системи на конічних (переважно регульованих) аеростатичних опорах.

Розрахункові схеми та варіанти конструкцій одноопорних приводів наведено у [4], а багатоопорних приводів – у [5, 6]. При цьому показано, що одноопорна система має масогабаритні та енергетичні переваги, але її застосування, порівняно з багатоопорною системою, обмежено за умовами прикладення технологічних навантажень, можли-

востями підведення робочого тіла до робочого органу з інструментом та обов'язковою відсутністю значущого за величиною згинального моменту на ротор.

2. Розрахунок приводу на статичну стійкість чи стійкість під впливом постійних за величиною сил (навантажень) різних напрямів.

При цьому визначаються максимальні сили реакції (несучі здатності) кожної з аеростатичних і далі, на основі розрахункової схеми [7] із відповідними системами рівнянь статичної рівноваги, визначається максимальне зовнішнє навантаження для приводу (його несуча здатність або вантажопідйомність).

Знаючи граничну величину навантажень, можна задати будь-які менші зовнішні сили і, у звор-

отному порядку, визначити сили реакцій та реактивні моменти, що виникають у кожній із опор.

Враховуючи, що проектується регульовані конічні опорні системи, конструктор повинен діапазонами параметрів приводу, що налаштовуються, охопити передбачувані діапазони параметрів реалізованого технологічного процесу. Для механічної обробки це насамперед жорсткість інструменту, частота обертання (отже швидкість різання), максимальні та номінальні зусилля (з урахуванням частоти обертання виходимо на потужність приводу).

Як правило, при проектуванні прагнуть не тільки досягти необхідних діапазонів за параметрами, але забезпечити деякий запас і максимальну регульованість.

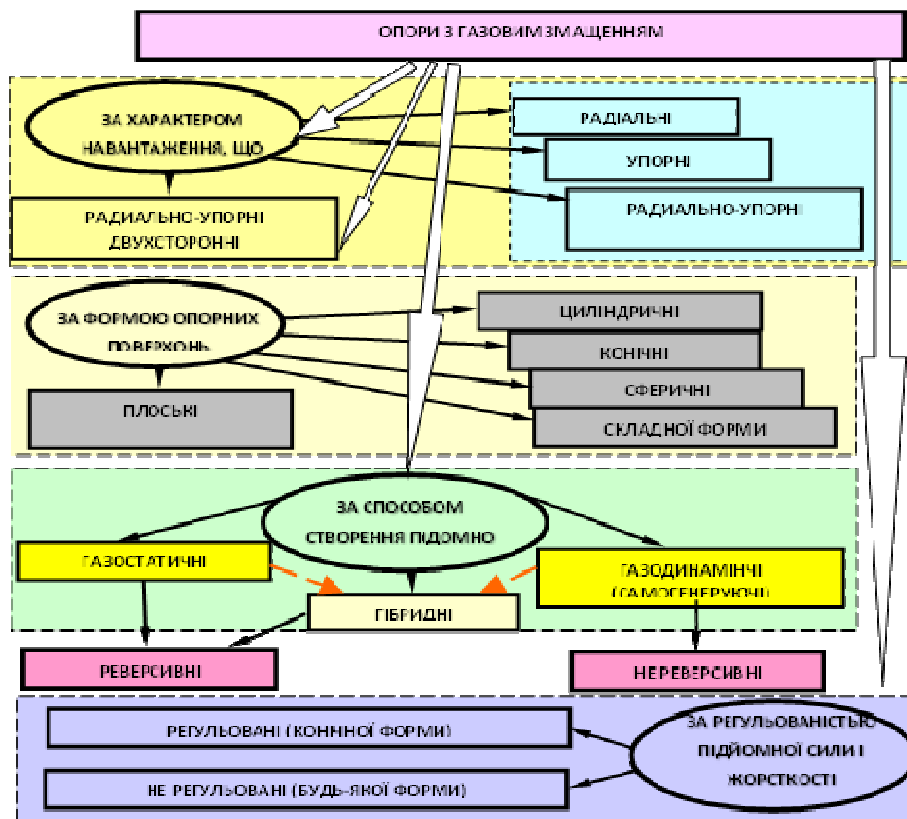


Рисунок 1 – Класифікація опор із газовим змащенням

3. Вибір конкретних варіантів конструкцій, попередній розрахунок параметрів (геометричних, силових, технологічних) та характеристик для структурних елементів приводу (вал, аеростатичні опори, рушій, корпус).

«Прикидковий» розрахунок конічної опорної системи дозволяє досить швидко перевірити пропонувану конструкцію за інтегральними характеристиками, насамперед за жорсткістю та несучою здатністю. У роботі [8] показано, що застосування конічних опор в малонавантажених високошвидкісних безконтактних приводах дає можливість знизити їх масу до 11%, габарити на 17% і витрату технологічного повітря на 25%.

4. Остаточне визначення статичних характеристик конічних аеростатичних опор аналітичним

методом та дублюючим (уточнюючим) розрахунком на основі методу скінченних елементів.

Перевірка приводу на статичну стійкість при дії максимально допустимих зовнішніх навантажень та досягнення ним заданої жорсткості. Для цього було розроблено методику аналітичного визначення статичних характеристик конічних опор, визначено умови працездатності [9].

У [10] показано розробку розрахункової схеми та дослідження статичних характеристик багатопорної аеростатичної системи аналітичним методом, а також скінченно-елементним аналізом у середовищі САПР (обчислювальним комп'ютерним експериментом).

5. Дослідження динамічної стійкості безконтактного приводу на основі запропонованого у [11]

критерію стійкості руху, а також одержаних рівнянь малих коливань [12–14], дослідження власних та критичних частот коливань за допомогою обчислювального комп'ютерного експерименту у програмах динамічного аналізу.

6. Застосування конструктивних удосконалень та вибір раціональних параметрів приводу для підвищення його надійності, по кращення функціональності та техніко-економічних характеристик.

У [10] виконано модернізацію одноопорної системи (рис.2), що дозволяє збільшити жорсткість при зниженні маси та витрати технологічного повітря.

У роботі [3, 10] для безконтактного приводу запропоновано використовувати конічні опори різної конструкції та розмірів (рис. 3) – з різними співвідношеннями осевих та радіальних вантажопідйомностей, показано способи регулювання величин середніх зазорів опор приводу. Через останні регулюються жорсткість і підйомна сила опор і всього приводу [9]. Розглянуті питання технічного вдосконалення опор щодо зміни конструкцій їх живильників і опорних поверхонь [6].

7. Вибір типу та конструктивне опрацювання рушії з урахуванням компоновальної схеми безконтактного приводу.

Тут найважливішим при проектуванні є забезпечення необхідної потужності до виконання корисної роботи (зазвичай із забезпеченням запасу

15...50 %) і досягнення заданого діапазону частот обертання.

Додаткові вимоги, як правило, пов'язані зі споживаною потужністю, динамікою розгону, регульованістю частоти обертання, показниками надійності, температурними режимами та необхідністю примусового охолодження, віброактивністю тощо.

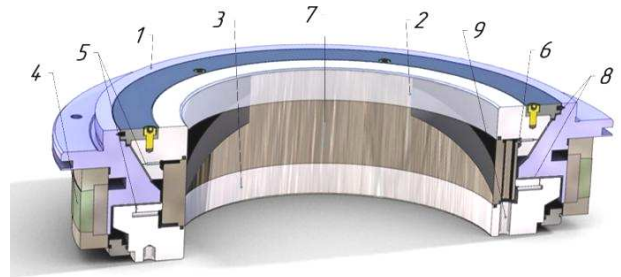


Рисунок 2 – Тривимірна модель модернізованої одноопорної системи:

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

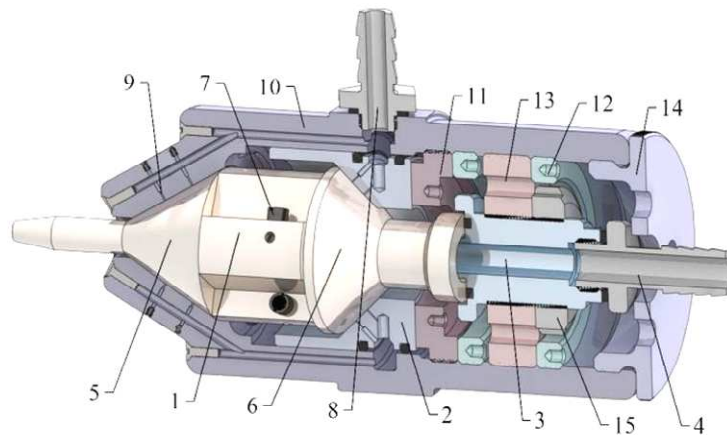


Рисунок 3 – Модель двоопорного безконтактного пневмошпинделя у розрізі:

1 – ротор з турбіною; 2 – під'ятник правої опори із системою каналів та живильників; 3 – втулка; 4 – штуцера подачі технологічного повітря на турбіну; 5 – рухлива конічна несуча поверхня лівої аеростатичної опори (парна їй нерухома поверхня належить корпусу); 6 – рухлива конічна несуча поверхня правої аеростатичної опори (парна їй нерухома поверхня належить під'ятнику); 7 – сопла Лавалю газової турбіни; 9 – обмежувачі витрати повітряного мастила (живильники); 10 – корпус; 11 – притискне кільце; 12 – стопорні кільця (2шт.); 13 – регульовальне кільце для втулки; 14 – кришка торцева; 15 – гайка стопорна для фіксації регульовального кільця.

Найбільш складною частиною проектування безконтактного приводу є розробка (проектний розрахунок) його опор, методику якої розглянемо докладніше.

Алгоритм проектувального розрахунку конічної опори по заданому навантаженню (зворотне завдання теорії газового мастила) полягає у реалізації двох етапів.

На першому етапі виконується орієнтовне визначення основних геометричних розмірів опори, які за інших усереднених параметрів забезпечують

необхідну вантажопідйомність. Потім виконується розрахунок статичних характеристик опори у першому наближенні.

На другому етапі виконуються уточнюючі розрахунки, при яких геометричні, технологічні та інші параметри змінюються від своїх початкових орієнтовних значень для отримання заданої несучої здатності та жорсткості. Ітераційно досягається виконання вимог ТЗ та за габаритами, масою, витратою технологічного повітря, критерієм стійкості руху тощо.

Виконані дослідження покладені в основу розробленої методики проектування аеростатичних опорних систем приводів за заданими навантаженнями та умовами їх функціонування.

Алгоритм проектування безконтактного приводу на конічних опорах наведено на рис. 4.

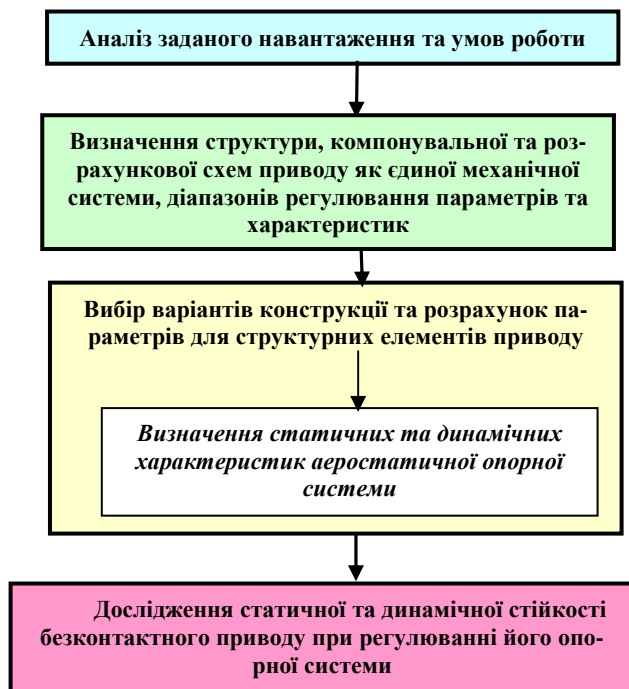


Рисунок 4 – Алгоритм проектування безконтактного приводу на конічних опорах

Висновки

Представлено методику та алгоритм проектування безконтактних приводів на регульованих конічних аеростатичних опорах, що включає основні напрямки та послідовність проектного розрахунку конічної опорної системи заданого навантаження на привод.

Список літератури

1. Федотов В.О., Федотова І.В. Оптимізація конструктивних параметрів шпиндельних вузлів на газостатичних опорах. *Всеукраїнський науково-технічний журнал Промислова гідроліка і пневматика*, 4 (34). 2011. С. 40–44.
2. Федотов В.О., Федотова І.В. Газові підвіси шпиндельних вузлів: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2010. 244 с.
3. Fedotova, I. Spindle on the conical gas suspension their design and research performance / I. Fedotova, V. Savulyak. *New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies*, Tehnomus. Suceava, Romania. 2013, Vol. 20. P. 234–239.
4. Wang Z., et al. Development of a high-speed air-bearing spindle using one-directional porous bearing. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2023, Vol. 37(9), P. 1707–1716.
5. Zhang H., et al. High-speed electro-spindle running on air bearings: Design and experimental verification. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016, Vol. 87, P. 9–18.
6. Childs B. Rotor dynamics for gas-lubricated turbomachinery. Cambridge University Press.
7. Брешев О.В., Носко П., Башта О.В., Радько М.О. Створення регульованих конічних аеростатичних опор для

безконтактних прямих приводів машин. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР, 1. 2024. С. 10–18.

8. Брешев О., Башта О., Носко П., Харченко А., Герасимов В., Ладик А. Аналіз конструкцій та підходи щодо проектування безконтактного привода обертання на опорах із газовим змашченням як єдиної та регульованої динамічної системи. *Проблеми тертя та зношування*, 2 (103). 2024. С.86–103.
9. Савуляк В.І., Федотова І.В. Статичні характеристики пневматичного конічного підвісу шпиндельного вузла з канавками змінної глибини. *Вісник НТУУ «КПІ» Серія машинобудування*, 64. 2012. С. 162–167.
10. Брешев, Олексій Володимирович. Вдосконалення безконтактних прямих приводів машин створенням регульованих конічних аеростатичних опор [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 / Брешев Олексій Володимирович; Східноукр. нац. ун-т ім. Володимира Даля. Луганськ, 2014. 24 с.
11. Wu J., et al. Active balancing control of a high-speed aerostatic spindle using piezoelectric actuators. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023, Vol. 189, 109903.
12. Нікіфоров А.Н. Проблеми коливальних і динамічної стійкості роторів які швидко обертуються [Електронний ресурс]: Вісник науково-технічного розвитку, 3(31), 2010.
13. Farid Al-Bender. Air Bearings Theory, Design and Applications / John Wiley & Sons Ltd, 2021. 595 p.
14. Yang J., et al. Modeling and analysis of a high-speed spindle with hybrid bearings considering the influence of bearing parameters. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019, Vol. 130, P. 262–279.

References (transliterated)

1. Fedotov V.O., Fedotova I.V. (2011). Optymizatsiya konstruktivnykh parametriv shpyndel'nykh vuzliv na hazostatychnykh oporakh [Optimization of design parameters of spindle assemblies on gas-static bearings]. *Vseukrayins'kyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal Promyslova hidravlika i pnevmatyka*, 4 (34). P. 40–44.
2. Fedotov V.O., Fedotova I.V. *Hazovi pidvisy shpyndel'nykh vuzliv [Gas suspensions for spindle units]: monohrafiya*. Vinnytsya : VNTU, 2010. 244 p.
3. Fedotova, I. (2013). Spindle on the conical gas suspension their design and research performance / I. Fedotova, V. Savulyak. *New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies, Tehnomus. Suceava, Romania*, Vol. 20. P. 234–239.
4. Wang Z., et al. (2023). Development of a high-speed air-bearing spindle using one-directional porous bearing. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 37(9), P. 1707–1716.
5. Zhang H., et al. (2016). High-speed electro-spindle running on air bearings: Design and experimental verification. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 87, P. 9–18.
6. Childs B. *Rotor dynamics for gas-lubricated turbomachinery*. Cambridge University Press.
7. Breshev O.V., Nosko P., Bashta O.V., Rad'ko M.O. (2024). Stvorenniya rehol'ovanykh konichnykh aerostatychnykh opor dlya bezkontaktnykh pryamykh pryvodiv mashyn [Development of adjustable conical aerostatic supports for contactless direct drives of machines]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHP»*. Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR, no. 1, pp. 10–18.
8. Breshev O., Bashta O., Nosko P., Kharchenko A., Herasymov V., Ladyk A. (2024). Analiz konstruktivnykh ta pidkhody shchodo proyektuvannya bezkontaktnoho pryvoda obertannya na oporakh iz hazovym zماشченням як єдиної та регульованої динамічної системи [Structural analysis and approaches to designing a contactless rotation drive on gas-lubricated bearings as a single, adjustable dynamic system]. *Problemy tertya ta znoshuvannya*, 2 (103), pp.86–103.
9. Savulyak V.I., Fedotova I.V. (2012). Statychni kharakterystyky pnevmatichnoho konichnoho pidvisu

- shpyndel'noho vuzla z kanavkamy zminnoyi hlybyny [Static characteristics of a pneumatic conical suspension of a spindle unit with variable depth grooves]. *Visnyk NTUU «KPI» Seriya mashynobuduvannya*, 64, pp. 162167.
10. Breshev, Olexsiy Volodymyrovych. *Vdoskonalennya bezkontaktnykh pryamykh pryvodiv mashyn stvorennym rehul'ovanykh konichnykh aerostatychnykh opor* [Improvement of contactless direct drives of machines by creating adjustable conical aerostatic supports] [Tekst] : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.02.02 / Breshev Olexsiy Volodymyrovych; Skhidnoukr. nats. un-t im. Volodymyra Dalya. Luhans'k, 2014. 24 s.
 11. Wu J., et al. (2023). Active balancing control of a high-speed aerostatic spindle using piezoelectric actuators. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 189, 109903.
 12. Nikiforov A.N. (2010). Problemy kolevan' i dynamichnoyi stiykosti rotoriv yaki shvydko obertayut'sya [Problems of vibrations and dynamic stability of high-speed rotating rotors] [Elektronnyy resurs]: *Visnyk naukovykh tekhnichnoho rozvytku*, 3(31), 2010.
 13. Farid Al-Bender. *Air Bearings Theory, Design and Applications* / John Wiley & Sons Ltd, 2021. 595 p.
 14. Yang J., et al. (2019). Modeling and analysis of a high-speed spindle with hybrid bearings considering the influence of bearing parameters. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 130, pp. 262-279.

Надійшло (received) 12.05.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Бресhev Олексій Володимирович / Breshev Olexsiy – кандидат технічних наук, здобувач, Державний університет «Київський авіаційний інститут», кафедра прикладної механіки та інженерії матеріалів; м. Київ, Україна; <https://orcid.org/0009-0007-4176-775X>; e-mail: abreshev@gmail.com

Башта Олександр Васильович / Bashta Olexsandr – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет «Київський авіаційний інститут», доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7914-897X>; e-mail: oleksandr.bashta@npp.kai.edu.ua

Носко Павло Леонідович / Nosko Pavlo – доктор технічних наук, професор, Державний університет «Київський авіаційний інститут», професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4792-6460>; e-mail: nosko_p@ukr.net

Радько Олег Віталійович / Radko Oleh – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет оборони України імені І. Черняхівського, доцент кафедри авіації; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6391-5713>; e-mail: nau12@ukr.net

Мельник Володимир Борисович / Melnyk Volodymyr – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет «Київський авіаційний інститут», доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4379-654X>; e-mail: volodymyr.melnyk@npp.kai.edu.ua