

УДК 629:621.438
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).11](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).11)

DYNAMIC CYLINDRICAL FILTER ELEMENT CHARACTERISTICS WITH SIDE CUTS

ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИЛІНДРИЧНОГО ФІЛЬТРОЕЛЕМЕНТУ З БОКОВИМИ РОЗРІЗАМИ

Oleksandr P. Shumilov
tyshumilova@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1325-454X

Yurii M. Halynkin
yurii.galynkin@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5272-4156

Viktor M. Sichko
ORCID: 0000-0002-5231-9975

Oleksandr A. Kostrikov
ZefirkaKakao@gmail.com
ORCID: 0009-0007-8174-9265

О. П. Шумілов,
канд. техн. наук, доцент

Ю. М. Галинкін,
канд. техн. наук, доцент

В. М. Січко,
канд. техн. наук, доцент

О. А. Костріков,
магістрант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Objective. To investigate the influence of design and operational parameters, in particular the width of the side slots and temperature, on the dynamic characteristics of a cylindrical filter element by determining the forms of natural oscillations and their frequencies.

Methods. The analysis was performed using the finite element method in the SolidWorks Simulation software package. A three-dimensional model of the filter element in the form of a thin-walled cylinder with slots was created. A modal analysis was performed in the frequency range of 0...3000 Hz at different values of the slot width (0...10 mm) and temperature (20...600 °C). The change in the mechanical properties of the material as a function of temperature was taken into account.

Results. The calculation results are presented in the form of dependencies and in the form of images of the vibration forms. Six forms of natural oscillations were determined, three of which are breathing and three are bending. It was found that with an increase in the width of the slot, the frequencies of natural oscillations decrease. For example, when the width is increased from 5 to 10 mm, the frequency of the first mode decreases from 476 to 442 Hz. Similarly, an increase in temperature from 20 to 600 °C reduces the frequency of the first mode from 442 to 390 Hz.

Scientific novelty. For the first time, the dynamic characteristics of a cylindrical filter element with slots under variable temperature and geometric parameters are comprehensively investigated. A modeling approach is proposed that takes into account the temperature dependence of the physical and mechanical properties of the material.

Practical significance. The results of the study make it possible to optimize the design of filter elements to avoid resonance phenomena during operation, which increases the reliability and durability of the elements under vibration conditions.

Key words: finite element method; vibration characteristics; cylindrical part; vibration forms; vibration frequencies; slot; temperature; model.

Анотація. Мета. Дослідити вплив конструктивних та експлуатаційних параметрів, зокрема ширини бокових прорізів і температури, на динамічні характеристики фільтрелементу циліндричної форми, визначивши форми власних коливань та частоти їх виникнення.

Методика. Для аналізу використано метод скінченних елементів у програмному комплексі SolidWorks Simulation. Створено тривимірну модель фільтрелементу у вигляді тонкостінного циліндра з прорізами. Проведено модальний аналіз у частотному діапазоні 0...3000 Гц при різних значеннях ширини прорізів (0...10 мм) та температури (20...600 °C). Враховано зміну механічних властивостей матеріалу в залежності від температури.

Результати. Результати розрахунку представлено у вигляді залежностей та у вигляді зображень форм коливань. Визначено шість форм власних коливань, три з яких є дихаючими, а три – згинними. Встановлено, що зі збільшенням ширини прорізу частоти власних коливань знижуються. Наприклад, при збільшенні ширини з 5 до 10 мм частота першої форми коливань знижується з 476 до 442 Гц. Аналогічно, підвищення температури з 20 до 600 °C зменшує частоту першої форми з 442 до 390 Гц.

Наукова новизна. Вперше комплексно досліджено динамічні характеристики циліндричного фільтрелементу з прорізами при змінних температурних і геометричних параметрах. Запропоновано підхід до моделювання з урахуванням температурної залежності фізико-механічних властивостей матеріалу.

Практична значимість. Результати дослідження дозволяють оптимізувати конструкцію фільтрелементів для уникнення резонансних явищ під час експлуатації, що підвищує надійність і довговічність елементів у вібраційних умовах.

Ключові слова: метод скінчених елементів; вібраційні характеристики; циліндрична деталь; форми коливань; частоти коливань; прорізи; температура; модель.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У машинобудуванні широко застосовуються деталі циліндричної форми, зокрема фільтроелементи, які працюють у складних умовах, зокрема при вібраційних навантаженнях і змінних температурах. Надмірні коливання можуть викликати резонансні явища, що призводять до руйнування конструкції. У зв'язку з цим виникає необхідність дослідження динамічних характеристик фільтрелементів для забезпечення їх надійності в експлуатації [1, 2].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Деталі циліндричної форми часто зустрічаються в машинобудуванні [1]. Наприклад, у двигунах внутрішнього згоряння, гідравлічних та пневматичних системах, підшипниках, валах і поршнях [2, 3]. Вони забезпечують ефективну передачу зусиль, руху та ущільнення, що є критично важливим для надійності та довговічності механізмів та машин [4, 5]. Такі механізми часто працюють в умовах вібраційних навантажень, обумовлених умовами експлуатації та особливістю робочих процесів, при змінних навантаженнях і підвищених температурах [6, 7]. Це вимагає додаткових заходів при проектуванні та розробці, що враховують умови динамічного навантаження [8]. Рационально виконана конструкція та правильний вибір матеріалу дозволяють мінімізувати знос, покращити енергоефективність і збільшити термін служби деталей, що працюють в умовах підвищених динамічних навантажень [9, 10]. Останні дослідження також підтверджують важливість поєднання експериментальних і чисельних методів для оцінки міцності та вібраційної поведінки складних машинобудівних компонентів. У [11] проведено чисельно-експериментальний аналіз трубчастої деталі з секціями, що дозволив встановити критичні ділянки концентрації напружень. Робота [12] виявила істотний вплив граничних умов закріплення на частотні характеристики лопаток газотурбінного двигуна, що має значення при оцінці їхньої надійності. У [13] методами електронної інтерферометрії та скінченно-елементного моделювання проаналізовано модальні характеристики

осьової лопатки компресора, що дозволило встановити закономірності зміни форм коливань залежно від умов навантаження. Дослідження [14] засвідчило ефективність поєднання методу електронної інтерферометрії з FEM для дослідження коливань алмазного дискового леза, показавши високу чутливість методики до виявлення локальних форм вібрацій. Ці результати підтверджують доцільність комплексного підходу до аналізу динаміки деталей, що працюють в умовах складних навантажень.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

У використаній літературі не було знайдено вирішення проблем вібрацій для циліндричних деталей з боковими прорізами і впливом температури на форми та частоти власних коливань.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Визначити форми та частоти власних коливань фільтрелементу з боковими прорізами та встановити вплив геометричних і температурних параметрів на динамічні характеристики елемента.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є фільтрелемент циліндричної форми з боковими прорізами. Предметом дослідження – його динамічні характеристики. Метод дослідження – визначення власних частот коливань деталі виконано у сучасній конструкторській CAD системі SolidWorks [15], яка дозволяє створювати тривимірні моделі, аналізувати їхню поведінку під різними, в тому числі і динамічними, навантаженнями та вдосконалювати конструкцію. В програмі реалізовано метод кінцевих елементів (FEA), завдяки чому визначаються власні частоти коливань деталей складної геометричної форми та форми їх коливань. Оскільки метод кінцевих елементів дозволяє розбити геометрично складну конструкцію на більш прості підобласті, які називаються скінченними елементами, кожен з цих елементів має просту форму (трикутник, квадрат, тетраedr, куб і т.д.) та може бути коректно описаний відомими математичними рівняннями.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для проведення дослідження побудована віртуальна тривимірна модель досліджуваного об'єкта у вигляді пустотілого циліндра діаметром 117 мм, висотою 86 мм, товщиною стінки 2,48 мм. На бічній поверхні циліндру присутні чотири ряди прорізів, при цьому кожний ряд містить в собі чотири прорізи, що утворюють рівновіддалений круговий масив. Відстань між прорізами складає 22 мм по колу, та 60 мм між центрами прорізів по висоті, рис. 1. Ширина прорізів змінювалась від 0 до 10 мм. Матеріал, який застосовано до досліджуваного об'єкта, нержавіюча сталь AISI 316, параметри властивостей матеріалу: модуль пружності $E = 193$ ГПа; коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,285$; щільність $\rho = 8000$ кг/м³. Значення параметрів отримано з бібліотеки матеріалів SolidWorks.

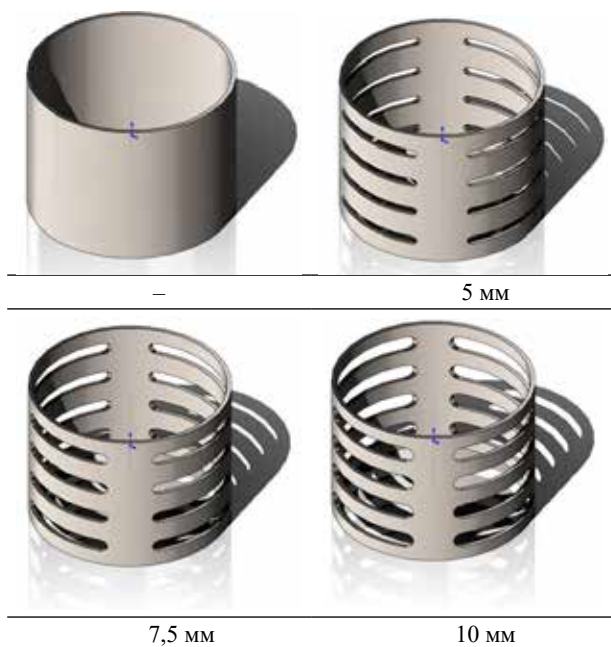


Рис. 1. Досліджуваний об'єкт – фільтроелемент

Сітка кінцевих елементів була побудована трикутниками з наступними параметрами: Тип сітки – сітка на твердому тілі; використовуване розбиття – сітка на основі змішаної кривизни; Точки Якобіана для сітки високої якості 16 точок; максимальний розмір елемента 3,24667 мм; мінімальний розмір елемента 1,08221 мм; якість сітки – висока. Граничні умови – вільне закріплення.

У діапазоні частот 0...3000 Гц визначено шість форм коливань. З них три належать до дихаючих (вузлові лінії ідуть паралельно медіанам), три до згинальних (присутня одна лінія, що проходить перпендикулярно до осі обертання) рис. 2, m – кількість вузлових ліній вздовж твірної циліндра, n – кількість перпендикулярних до осі обертання циліндру вузлових ліній.

Оскільки в різних конструкціях можуть бути використані різні ширини бокового прорізу, наведено вплив цього параметру на частоту виникнення власних форм коливань. Так для при зміні ширини прорізу з 5 до 10 мм частота виникнення першої форми коливань зменшується з 476 Гц до 442 Гц, другої – з 724 до 606 Гц, третьої – з 1344 Гц до 1276 Гц, четвертої – з 1653 Гц до 1579 Гц, п'ятої – з 2492 Гц до 2445 Гц, шостої з 2843 Гц до 2686 Гц, рис. 3.

Таблиця 1. Залежність механічних параметрів від температури

Температура °К	Коефіцієнт Пуассона μ	Модуль пружності E , ГПа
293	0,285	198
383	0,300	190
473	0,302	183
573	0,310	175
773	0,320	158
973	0,330	141

Слід також додати, для кожної з визначених форм присутня аналогічна форма коливань зі зміщенням меридіональних вузлових ліній на половину кутової відстані між найближчими вузловими лініями, тобто для першої форми таке зміщення становить 45°, для третьої – 15°, для п'ятої – 11,25°, а частота при цьому змінюється не більше ніж на 1 Гц. Такі рішення не наведено, аби не захащувати малюнок.

Оскільки фізичні властивості матеріалу змінюються при зміні температури [16, 17], був визначений вплив температури на власні форми коливань. Для цього для деталі з прорізами шириною 10 мм, визначено спектр власних коливань для температурного діапазону 20...600 °С. Механічні властивості матеріалу задано у вигляді температурних залежностей (табл. 1) [16, 17]. Для модуля Юнга використовувалася лінійна залежність, для коефіцієнта Пуассона – нелінійна в залежності від дільниці. Температура досліджуваного об'єкта на кожному режимі прийнята сталою, установленою, крок зміни температури – 100 °С.

Для врахування впливу температурних залежностей у бібліотеці матеріалів SolidWorks створено новий матеріал на основі сталі 20Х25Н20С2, але його механічні властивості розрахунком не беруться як сталі величини, а враховуються відповідно до механічних властивостей, наведених вище (див. табл. 1). Після чого температура досліджуваного об'єкта задана у вікні «Основні властивості розрахунку», вкладка «Інше». Залежність частоти виникнення власних коливань від температури показано на рис. 4. Для першої форми частота зменшується з 442 Гц до 390 Гц, другої – з 606 до 534 Гц, третьої – з 1276 Гц до 1129 Гц.

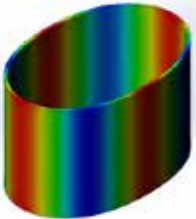
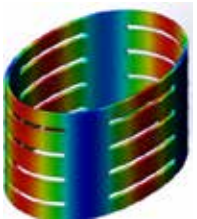
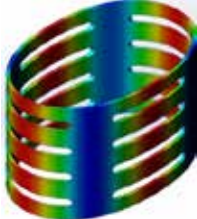
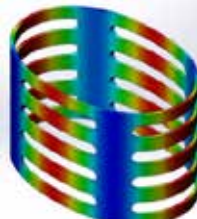
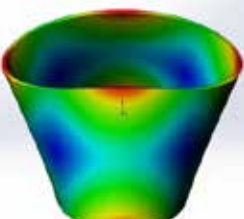
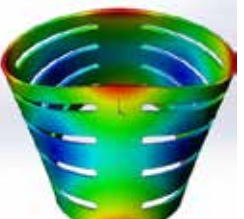
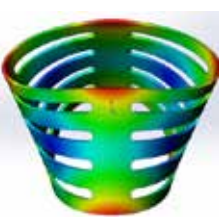
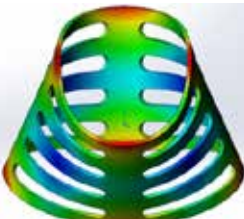
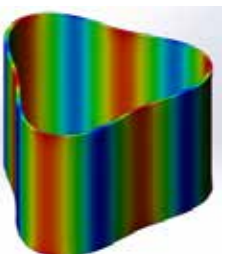
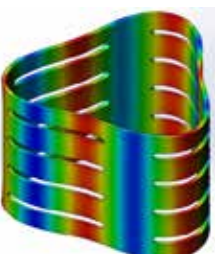
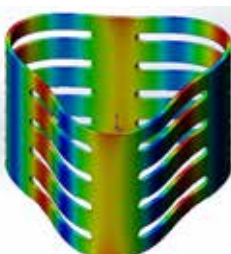
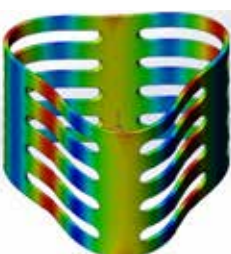
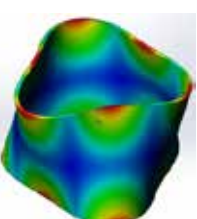
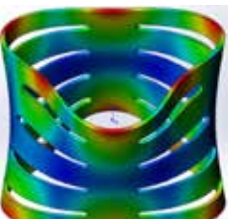
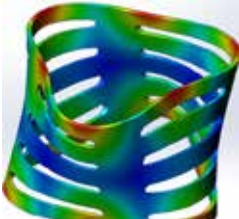
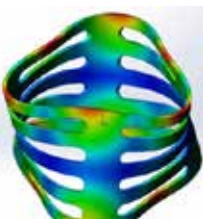
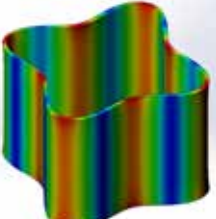
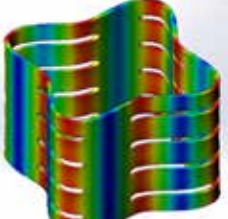
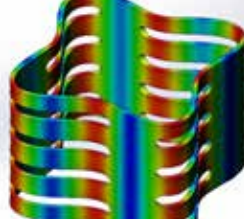
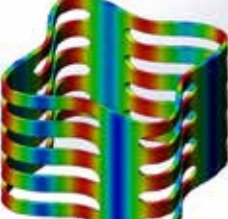
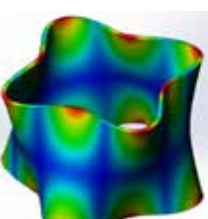
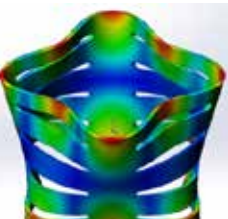
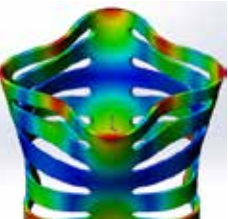
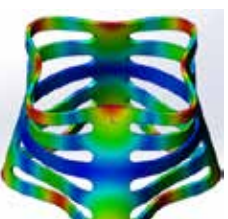
№	n	m	0	5	7.5	10
1	0	4				
			476	454	449	442
2	1	4				
			724	664	638	606
3	0	6				
			1344	1309	1295	1276
4	1	6				
5	0	8				
			2572	2492	2469	2445
6	1	8				
			3097	2843	2774	2686

Рис. 2. Форми коливань фільтроелементу

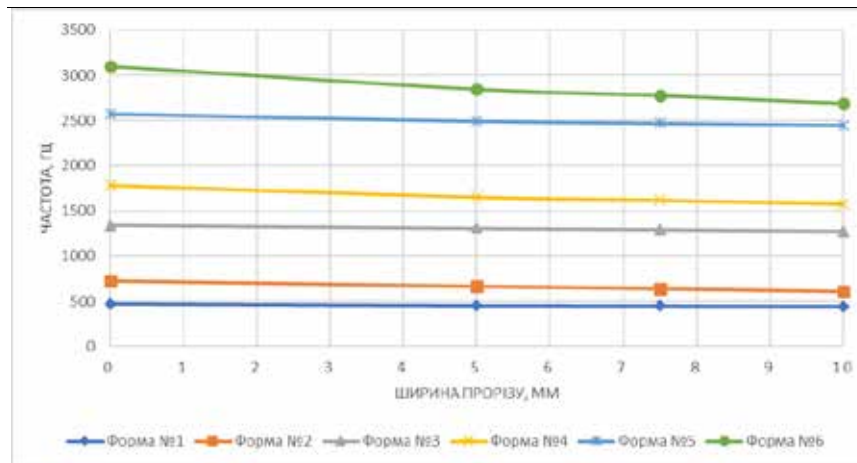


Рис. 3. Вплив ширини бокового прорізу на частоти власних коливань фільтроелементу

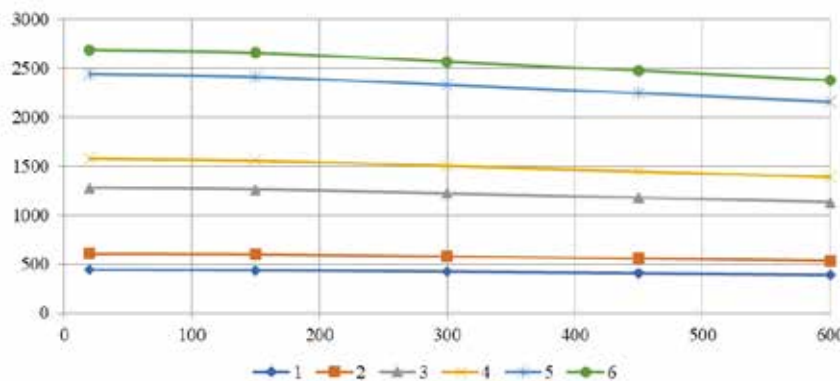


Рис. 4. Вплив температури на частоти власних коливань фільтроелементу

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати демонструють суттєвий вплив геометрії прорізів та температури на динамічні властивості фільтроелемента. Це дозволяє стверджувати, що на етапі проектування конструкцій таких елементів доцільно враховувати можливість виникнення резонансних частот та вживати заходів з їх уникнення – зміна геометрії, вибір матеріалу або температурна стабілізація.

ВИСНОВКИ

1. Для корпусу фільтра визначено частоти власних коливань: у діапазоні 0...3кГц виявлено шість

форм коливань. З них три відносяться до дихаючих, три – до згинних.

2. Встановлено вплив ширини бокового прорізу на форми власних коливань: при зміні ширини прорізу з 5 до 10 мм частота виникнення першої форми коливань зменшується з 476 Гц до 442 Гц, другої – з 724 до 606 Гц, третьої – з 1344 Гц до 1276 Гц.

3. Встановлено вплив температури на власні частоти коливань для ширини прорізу 10 мм: при збільшенні температури з 20 °C до 600 °C частота виникнення першої форми коливань зменшується з 442 Гц до 390 Гц, другої – з 606 до 534 Гц, третьої – з 1276 Гц до 1129 Гц.

REFERENCES

- [1] Kipper, L. M., Furstenuau, L. B., Hoppe, D., Frozza, R., & Iepsen, S. (2020). Scopus scientific mapping production in industry 4.0 (2011–2018): a bibliometric analysis. *International Journal of Production Research*, 58(6), pp. 1605–1627. DOI: 10.1080/00207543.2019.1671625.
- [2] Rao, S. S., & Yap, F. F. (1995). *Mechanical vibrations* (Vol. 4, pp. 75–848). New York: Addison-Wesley.
- [3] Safaeinejad, A., Rahimi, M., Zhou, D., & Blaabjerg, F. (2024). A sensorless active control approach to mitigate fatigue loads arising from the torsional and blade edgewise vibrations in PMSG-based wind turbine system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 155, 109525. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109525.

- [4] Engel, B., & Al-Maeni, S. S. H. (2019). An integrated reverse engineering and failure analysis approach for recovery of mechanical shafts. *Procedia CIRP*, 81, pp. 1083–1088.
- [5] Foss, M. A. R. Y., Liu, Y., & Yarahmadian, S. H. A. N. T. I. A. (2022). Project-Based Learning in a Virtual Setting: A Case Study on Materials and Manufacturing Process and Applied Statistics. *Int. J. Eng. Educ.*, 38, pp. 1377–1388.
- [6] Xiang, L., Yang, S., & Gan, C. (2012). Torsional vibration measurements on rotating shaft system using laser doppler vibrometer. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(11), pp. 1596–1601.
- [7] Norton, R. L. (2002). *Cam design and manufacturing handbook*. Industrial Press.
- [8] Ahmed, H., & Nandi, A. K. (2020). *Condition monitoring with vibration signals: Compressive sampling and learning algorithms for rotating machines*. John Wiley & Sons.
- [9] Heller, D., Sever, I. A., & Schwingshackl, C. W. (2020). A method for multi-harmonic vibration analysis of turbomachinery blades using Blade Tip-Timing and clearance sensor waveforms and optimization techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 142, 106741. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.106741.
- [10] Zhou, D., Yang, Q., Wang, L., & Li, J. (2021). Stability and control of maglev vehicle–girder coupled system considering torsional vibration of the girder. *ISA Transactions*, 111, pp. 309–322. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.12.005.
- [11] Tkach, M., Halinkin, Y., Zolotoy, Y., Monakhov, A., Dotsenko, S., & Zhuk, I. (2024). Eksperymentalne ta rozrakhunkove doslidzhennia trubchastoi detali z sektsiamy [Experimental and calculation study of a tubular part with sections]. *Aviakosmichna tekhnika i tekhnolohiia – Aerospace Technic and Technology*, 0(4sup2), 52–59. <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.4sup2.07>. [in Ukrainian].
- [12] Tkach, M., Kulishov, S., Polischuk, V., Halynkin, Y., Proskurin, A., & Kluchnyk, V. (2022). Teoretychne ta eksperymentalne vyznachennia vplyvu hranichnykh umov na vibratsiini kharakterystyky lopatky hazoturbinnoho dvyhuna [Theoretical and experimental determination of the boundary conditions influence on gas turbine blade vibration characteristics]. *Aviakosmichna tekhnika i tekhnolohiia – Aerospace Technic and Technology*, 0(4sup2), 50–61. <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.4sup2.08>. [in Ukrainian].
- [13] Tkach, M., Morhun, S., Zolotoy, Y., & Zhuk, I. (2022). Modalnyi analiz osovoi lopatky kompresora: udoskonalena elektronna interferometriia iz chasovoioi zalezhnosti ta metod skinchenykh elementiv [Modal Analysis of the Axial Compressor Blade: Advanced Time-Dependent Electronic Interferometry and Finite Element Method]. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 39(4), 589–597. <https://doi.org/10.1515/tjj-2020-0014>. [in Ukrainian].
- [14] Tkach, M., Halynkin, Y., Proskurin, A., Zhuk, I., Kluchnyk, V., & Bobylev, I. (2021). Eksperymentalne doslidzhennia vibratsiinykh kharakterystyk almaznogo dyskovoho leza z vykorystanniam elektronnoyi interferometriyi ta MSE [An Experimental Study of the Vibrational Characteristics of a Diamond Circular Blade Using Electronic Speckle-Pattern Interferometry and FEM]. *Acta Mechanica et Automatica*, 15(1), 16–23. <https://doi.org/10.2478/ama-2021-0003>. [in Ukrainian].
- [15] Mustapha, K. B. (2022). *Practical Finite Element Simulations with SOLIDWORKS 2022: An illustrated guide to performing static analysis with SOLIDWORKS Simulation*. Packt Publishing Ltd.
- [16] Kim, B. G., Rempe, J. L., Knudson, D. L., Condie, K. G., & Sencer, B. H. (2012). In-situ creep testing capability for the advanced test reactor. *Nuclear Technology*, 179(3), pp. 417–428. DOI: 10.13182/NT12-A13613.
- [17] Nandwana, D., Bhupendra, N. K., Bhargava, T., Nandwana, K., & Jawale, G. (2010). Design, Finite Element analysis and optimization of HRC trays used in heat treatment process. In *Proceedings of the World Congress on Engineering* (Vol. 2).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kipper, L. M., Furstenu, L. B., Hoppe, D., Frozza, R., & Iepsen, S. (2020). Scopus scientific mapping production in industry 4.0 (2011–2018): a bibliometric analysis. *International Journal of Production Research*, 58(6), pp. 1605–1627. DOI: 10.1080/00207543.2019.1671625.
- [2] Rao, S. S., & Yap, F. F. (1995). *Mechanical vibrations* (Vol. 4, pp. 75–848). New York: Addison-Wesley.
- [3] Safaieinejad, A., Rahimi, M., Zhou, D., & Blaabjerg, F. (2024). A sensorless active control approach to mitigate fatigue loads arising from the torsional and blade edgewise vibrations in PMSG-based wind turbine system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 155, 109525. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109525.
- [4] Engel, B., & Al-Maeni, S. S. H. (2019). An integrated reverse engineering and failure analysis approach for recovery of mechanical shafts. *Procedia CIRP*, 81, pp. 1083–1088.
- [5] Foss, M. A. R. Y., Liu, Y., & Yarahmadian, S. H. A. N. T. I. A. (2022). Project-Based Learning in a Virtual Setting: A Case Study on Materials and Manufacturing Process and Applied Statistics. *Int. J. Eng. Educ.*, 38, pp. 1377–1388.
- [6] Xiang, L., Yang, S., & Gan, C. (2012). Torsional vibration measurements on rotating shaft system using laser doppler vibrometer. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(11), pp. 1596–1601.
- [7] Norton, R. L. (2002). *Cam design and manufacturing handbook*. Industrial Press.
- [8] Ahmed, H., & Nandi, A. K. (2020). *Condition monitoring with vibration signals: Compressive sampling and learning algorithms for rotating machines*. John Wiley & Sons.
- [9] Heller, D., Sever, I. A., & Schwingshackl, C. W. (2020). A method for multi-harmonic vibration analysis of turbomachinery blades using Blade Tip-Timing and clearance sensor waveforms and optimization techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 142, 106741. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.106741.

- [10] Zhou, D., Yang, Q., Wang, L., & Li, J. (2021). Stability and control of maglev vehicle–girder coupled system considering torsional vibration of the girder. *ISA Transactions*, 111, pp. 309–322. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.12.005.
- [11] Ткач, М., Галинкін, Ю., Золотий, Ю., Монахов, А., Доценко, С., & Жук, І. (2024) Експериментальне та розрахункове дослідження трубчастої деталі з секціями. *Aerospace Technic and Technology*. № 0(4sup2). С. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.4sup2.07>.
- [12] Ткач, М., Кулішов, С., Поліщук, В., Галинкін, Ю., Проскурін, А., & Ключник, В. (2022) Теоретичне та експериментальне визначення впливу граничних умов на вібраційні характеристики лопатки газотурбінного двигуна. *Aerospace Technic and Technology*. № 0(4sup2). С. 50–61. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.4sup2.08>.
- [13] Ткач, М., Моргун, С., Золотий, Ю., & Жук, І. (2022) Модальний аналіз осьової лопатки компресора: удосконалена електронна інтерферометрія із часовою залежністю та метод скінченних елементів. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*. Т. 39, № 4. С. 589–597. DOI: <https://doi.org/10.1515/tjj-2020-0014>.
- [14] Ткач, М., Галинкін, Ю., Проскурін, А., Жук, І., Ключник, В., & Бобилєв, І. (2021) Експериментальне дослідження вібраційних характеристик алмазного дискового леза з використанням електронної інтерферометрії та МСЕ. *Acta Mechanica et Automatica*. Т. 15, № 1. С. 16–23. DOI: <https://doi.org/10.2478/ama-2021-0003>.
- [15] Mustapha, K. B. (2022). *Practical Finite Element Simulations with SOLIDWORKS 2022: An illustrated guide to performing static analysis with SOLIDWORKS Simulation*. Packt Publishing Ltd.
- [16] Kim, B. G., Rempe, J. L., Knudson, D. L., Condie, K. G., & Sencer, B. H. (2012). In-situ creep testing capability for the advanced test reactor. *Nuclear Technology*, 179(3), pp. 417–428. DOI: 10.13182/NT12-A13613.
- [17] Nandwana, D., Bhupendra, N. K., Bhargava, T., Nandwana, K., & Jawale, G. (2010). Design, Finite Element analysis and optimization of HRC trays used in heat treatment process. In *Proceedings of the World Congress on Engineering* (Vol. 2).

© Шумілов О. П., Галинкін Ю. М., Січко В. М., Костріков О. А.

Дата надходження статті до редакції: 18.04.2025

Дата затвердження статті до друку: 10.05.2025