

*М. А. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, М. М. ТКАЧУК, М. В. ПРОКОПЕНКО, О. Ю. ШУТЬ,
А. І. ЛІПЕЙКО, Б. Я. ЛИТВИН, Є. М. ОВЧАРОВ, Д. В. МОСНІЦЬКА*

ЧУТЛИВІСТЬ МІЦНІСНИХ, ЖОРСТКІСНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСОЛЬНОГО РОТОРА ДО ВАРІЮВАННЯ ПРОЕКТНИХ ПАРАМЕТРІВ

У роботі описано аналіз чутливості міцнісних, жорсткісних та динамічних характеристик консольного ротора до варіювання проектних параметрів. Контролюється рівень пружних переміщень робочого колеса та критичні швидкості обертання роторної частини. Варіюються швидкість обертання вала, матеріал робочого колеса. Для об'єктів типу роторних систем із консольним розташуванням робочого колеса введено до розгляду не один, а набір критеріїв, які мають бути враховані у ході досліджень подібного типу об'єктів. Установлені залежності радіальних та осевих переміщень від кутових швидкостей обертання та модуля пружності матеріалу робочого колеса. Також визначені тенденції зміни першої та другої критичних швидкостей обертання від модуля пружності, частот обертання ротора та густини матеріалу робочого колеса. На цій основі розроблені рекомендації стосовно визначення проектних параметрів роторної частини нагнітача повітря із консольно розташованим робочим колесом.

Ключові слова: нагнітач повітря; критична швидкість обертання; власна частота коливань; роторна система; напружено-деформований стан

*Н. А. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСКИЙ, Н. Н. ТКАЧУК, Н. В. ПРОКОПЕНКО, А. Ю. ШУТЬ,
А. И. ЛИПЕЙКО, Б. Я. ЛИТВИН, Е. Н. ОВЧАРОВ, Д. В. МОСНИЦКАЯ*

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЧНОСТНЫХ, ЖЕСТКОСТНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСОЛЬНОГО РОТОРА К ВАРЬИРОВАНИЮ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

В работе описан анализ чувствительности прочностных, жесткостных и динамических характеристик консольного ротора к варьированию проектных параметров. Варьируются скорость вращения вала, материал рабочего колеса. Для объектов типа роторных систем с консольным расположением рабочего колеса введено к рассмотрению не один, а набор критериев, которые должны быть учтены в ходе испытаний подобного типа объектов. Установлены зависимости радиальных и осевых перемещений от угловых скоростей вращения и модуля упругости материала рабочего колеса. Также определены тенденции изменения первой и второй критических скоростей вращения от модуля упругости, частот вращения ротора и плотности материала рабочего колеса. На этой основе разработаны рекомендации по определению проектных параметров роторной части нагнетателя воздуха с консольно расположенным рабочим колесом.

Ключевые слова: нагнетатель воздуха; критическая скорость вращения; собственная частота колебаний; роторная система; напряженно-деформированное состояние

*М. А. ТКАЧУК, А. ГРАБОВСКИЙ, М. М. ТКАЧУК, Н. ПРОКОПЕНКО, О. ШУТЬ, А. ЛИПЕЙКО,
В. ЛИТВИН, Е. ОВЧАРОВ, Д. МОСНИЦКА*

SENSITIVITY OF STRENGTH, RIGID AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE CONSOLE ROTOR TO VARIATION OF DESIGN PARAMETERS

The analysis sensitivity of strength, rigid and dynamic characteristics of the console rotor to variation of design parameters in paper describes The speed of rotation of the shaft, the material of the impeller vary. The dependences of radial and axial displacements on the angular velocities of rotation and the modulus of elasticity of the impeller material are established. For objects of the type of rotary systems with a cantilever arrangement of the impeller, not one, but a set of criteria has been introduced into consideration, which should be taken into account in the research of this type of objects. The tendencies of change of the first and second critical rotational speeds from the modulus of elasticity, rotor rotational frequencies and density of the impeller material are also determined. On this basis, recommendations have been developed for determining the design parameters of the rotor part of the air blower with a cantilevered impeller.

Keywords: air blower; critical rotation speed; natural vibration frequency; rotary system; stress-strain state

Вступ. Для сучасних двигунів внутрішнього згорання великої потужності як один із варіантів технічного рішення характерне застосування консольного розташування робочого колеса нагнітача повітря відносно підшипникових опор. Ще однією особливістю є наявність двох гілок підводу потужності (колінчастий вал двигуна та турбіна, що працює на газах, які відпрацювали у двигуні). Оскільки робочий діапазон частот обертання двигуна достатньо широкий, а рівень потреби у повітрі – високий, то роторна частина нагнітача повітря працює в умовах інтенсивних динамічних навантажень. Відповідно, необхідні дослідження залежності жорсткісних та динамічних характеристик роторної частини нагнітача від його проектних параметрів. Це сформувало напрямок розробок, описаних у роботі.

Аналіз сучасного стану досліджень роторних систем. Роторні системи представляють постійний значний інтерес для дослідників [1–12]. Аналіз цих робіт

описаний, зокрема, у роботі [13]. Можна відзначити, що у багатьох роботах увага приділяється в основному стійкості руху та керованості робочих режимів роторних систем. Це досягається за рахунок проектних параметрів роторної частини в цілому, за рахунок характеристик опорних елементів та керуючого впливу на них.

Разом із тим для варіанта конструктивного виконання із консольним розташуванням робочого колеса важливим критерієм та обмеженням є також рівень його пружних деформацій. Дійсно, за рахунок пружного деформування цього колеса (диска із лопатями) змінюється початковий зазор між ним та напрямною поверхнею дифузора статорної частини нагнітача. Відповідно можуть виникнути проблемні ситуації із працездатністю.

© М. А. Ткачук, А. В. Грабовський, М. М. Ткачук,
М. В. Прокопенко, О. Ю. Шуть, А. І. Ліпейко,
Б. Я. Литвин, Є. М. Овчаров, Д. В. Мосніцька, 2021

Таким чином, необхідно здійснювати аналіз залежності і динамічних, і жорсткісних характеристик роторної частини нагнітача повітря від варійованих параметрів. Подібні аспекти у попередніх дослідженнях не ставилися. Це формує проблемну ситуацію.

Мета роботи – дослідження чутливості міцнісних, жорсткісних та динамічних характеристик консольного ротора до варіювання проектних параметрів задля формування на цій основі рекомендацій із технічних рішень роторних частин нагнітачів повітря двигунів внутрішнього згоряння.

Загальне формулювання задач. На прикладі тестового зразка конструкції роторної системи із консольним розташуванням робочого колеса, наведеної на рис. 1, здійснено аналіз напружено-деформованого стану (НДС) та критичної швидкості обертання.

Обидві задачі розв’язуються за допомогою метода

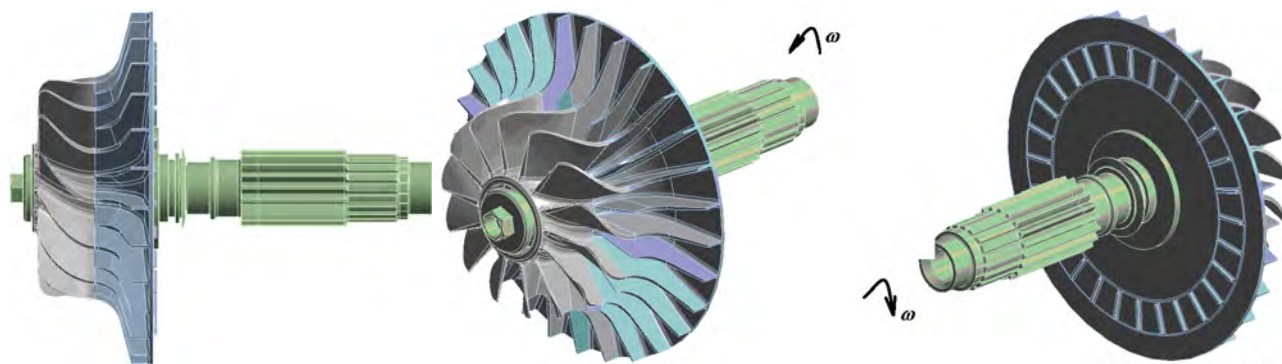


Рисунок 1 – Приклад роторної системи з консольним розташуванням робочого колеса

Враховуючи, що

$$U = K^{-1}(p, \omega) \cdot f(p, \omega), \quad (2)$$

маємо розв’язок у вигляді $U = U(p, \omega)$ та із подальшим застосуванням співвідношень теорії пружності [14] формується просторовий розподіл компонент НДС (вектора переміщень u , тензорів деформацій ε та напружень σ), який містить у собі неявну параметричну залежність від параметрів p та кутової швидкості обертання ω .

Отже, розв’язання системи рівнянь (2) дає змогу обчислювати компоненти НДС роторної системи із консольним розташуванням робочого колеса:

$$\begin{aligned} u_i &= u_i(x_i, p_s, \omega); \quad \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(x_i, p_s, \omega); \\ \sigma_{ij} &= \sigma_{ij}(x_i, p_s, \omega), \end{aligned} \quad (3)$$

де x_i – координати точок досліджуваного об’єкта із радіус-вектором $r(x_1, x_2, x_3)$;

p_s – компоненти масиву параметрів p .

У результаті стає можливим визначення жорсткісних та міцнісних характеристик елементів роторної системи із консольним розташуванням робочого колеса.

З іншого боку, задача визначення критичних швидкостей обертання Ω роторної системи із консольним

скінченних елементів (МСЕ) [14].

Для визначення НДС роторної системи із консольним розташуванням робочого колеса отримуємо систему рівнянь теорії пружності [15]:

$$K(p, \omega) \cdot U = f(\omega, p), \quad (1)$$

де $K(p, \omega)$ – матриця жорсткості скінченно-елементної моделі, яка залежить від масиву проектних параметрів p та кутової швидкості обертання ω ;

$f(p, \omega)$ – вектор вузлових навантажень від дії відцентрових сил;

U – вектор вузлових параметрів (наприклад, переміщень).

розташуванням робочого колеса зводиться до пошуку коренів задачі на власні значення Λ системи рівнянь

$$\left[K(\omega, p) - \Omega^2 \cdot M(\omega, p) \right] \Lambda = 0, \quad (4)$$

де K і M – відповідно матриці жорсткості та мас досліджуваної конструкції;

Λ – форма втрати стійкості початкового стану роторної системи із консольним розташуванням робочого колеса.

Розв’язання (4), тобто визначення

$$\Omega = \Omega(\omega, p) \text{ та } \Lambda = \Lambda(\omega, p), \quad (5)$$

дає можливість визначати критичні форми та частоти досліджуваної системи у залежності від варійованих величин.

Таким чином, розв’язки (3) та (5) створюють основу для формування і розв’язання як задач аналізу міцнісних, жорсткісних та динамічних характеристик, так і обґрунтування раціональних технічних рішень роторної системи із консольним розташуванням робочого колеса.

Тестові задачі досліджень. Для організації багатоваріантних досліджень обрано номінальний варіант роторної системи із консольним розташуванням робочого колеса із такими параметрами p_i ($i = 1, 2, \dots$): $d_0 = 125$, $D_0 = 200$, $l_{10} = 240$ мм, $l_{20} = 105$ мм (див.

рис. 2), матеріал вала – сталь (модуль пружності $E_0^* = 2 \cdot 10^{11}$ Па, коефіцієнт Пуасона $\nu_0^* = 0,3$), матеріал робочого колеса – алюмінієвий сплав ($E_0 = 0,71 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu_0 = 0,33$). У ході досліджень здійснювалося варіювання параметрами шляхом множення номінальних значень на відповідний безрозмірний коефіцієнт α_i : $p_i(\alpha) = \alpha_i p_i(0)$.

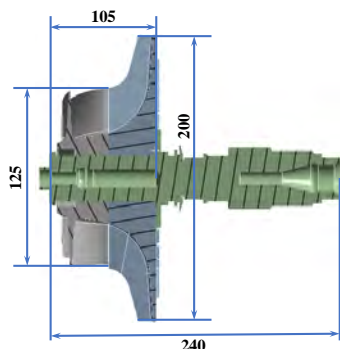


Рисунок 2 – Номінальний варіант досліджуваної роторної системи

Напружено-деформований стан елементів роторної системи із консольним розташуванням робочого колеса. У ході досліджень варіювалися: $p_1 \equiv \omega$ у

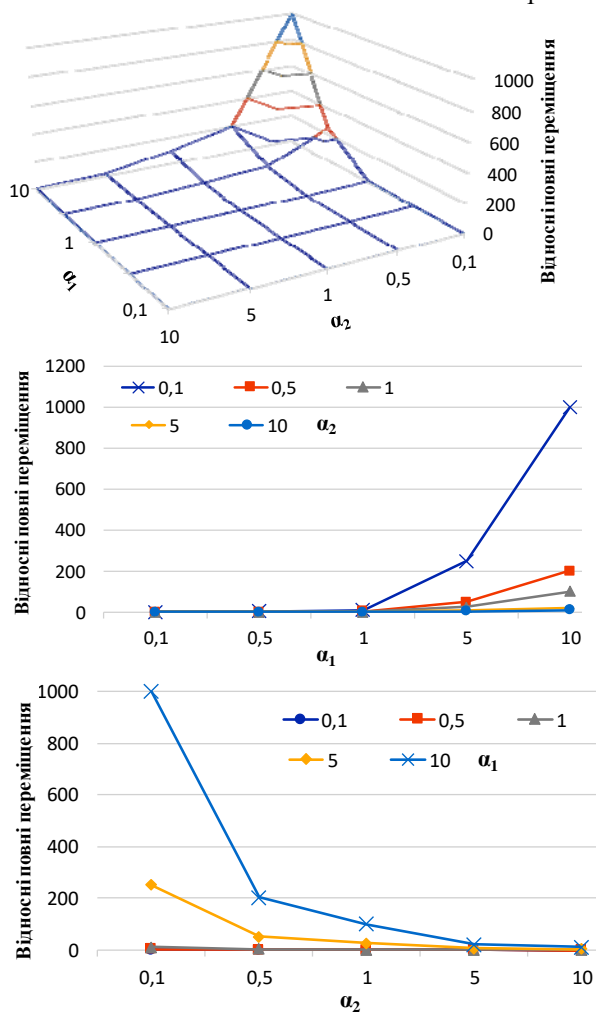


Рисунок 3 – Залежності $\gamma_1(\alpha_1, \alpha_2)$, $\gamma_1(\alpha_1, 1)$, $\gamma_1(1, \alpha_2)$

діапазоні від $\omega_0 = 1200 \text{ с}^{-1}$ (10000 об/хв.) із коефіцієнтом $\alpha_1 \in [0,1;10]$. Модуль пружності $p_2 \equiv E$ варіювався за допомогою зміни α_2 в інтервалі $[0,1; 10]$.

Після розв'язання задачі (3) визначалися, зокрема, максимальні повні переміщення u_{\max} та еквівалентні напруження за Мізесом σ_{\max} . Тоді, беручи їхній відносний рівень

$$\gamma_i(\alpha) = \gamma_i(\alpha) / \gamma_i(1), \quad (6)$$

тобто

$$\begin{aligned} \gamma_1(\alpha_i) &= u_{\max}(\alpha_i) / u_{\max}(1); \\ \gamma_2(\alpha_i) &= \sigma_{\max}(\alpha_i) / \sigma_{\max}(1), \end{aligned} \quad (7)$$

можна побудувати у координатах α_i поверхні відгуку, що становлять інтерес.

Зокрема, на рис. 3–6 наведені залежності γ_1, γ_2 від α_1, α_2 , а також відповідні залежності розмірних величин.

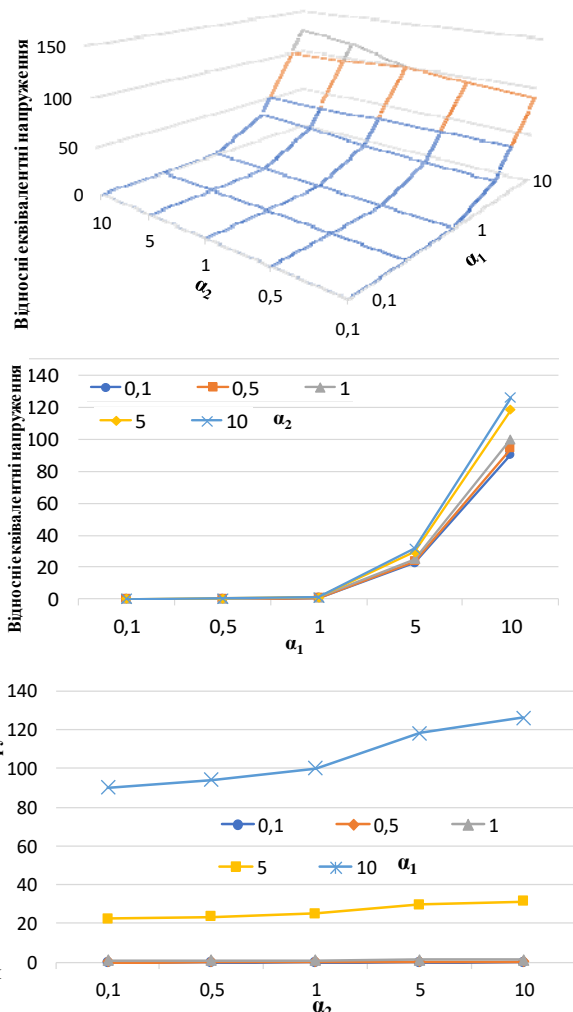


Рисунок 4 – Залежності $\gamma_2(\alpha_1, \alpha_2)$, $\gamma_2(\alpha_1, 1)$, $\gamma_2(1, \alpha_2)$

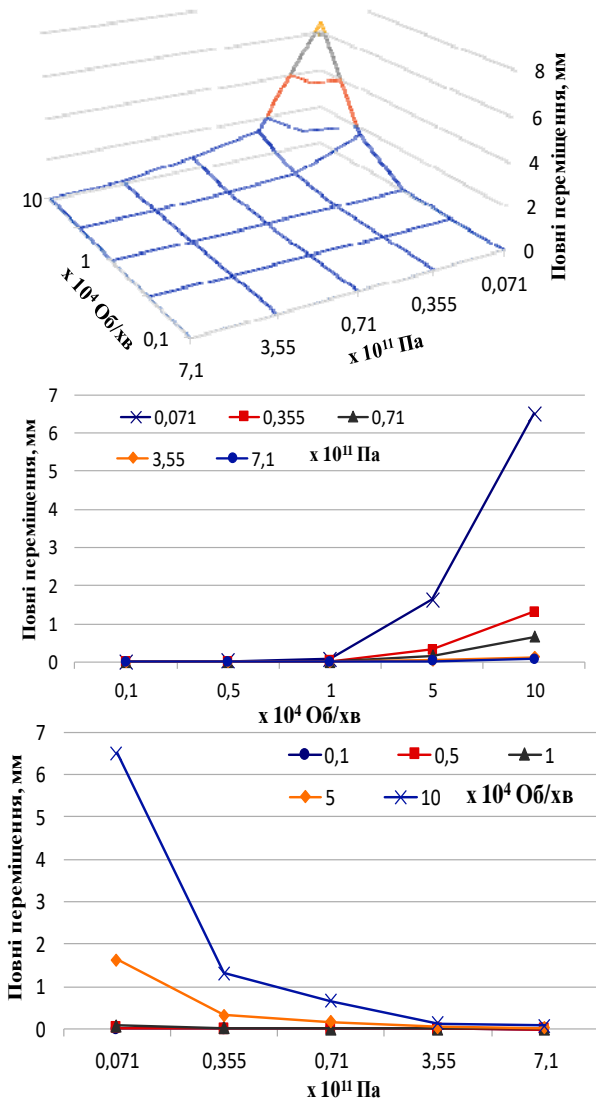


Рисунок 5 – Залежності рівня повних переміщень, мм, від варійованих швидкості обертання, об/хв., та модуля пружності, Па

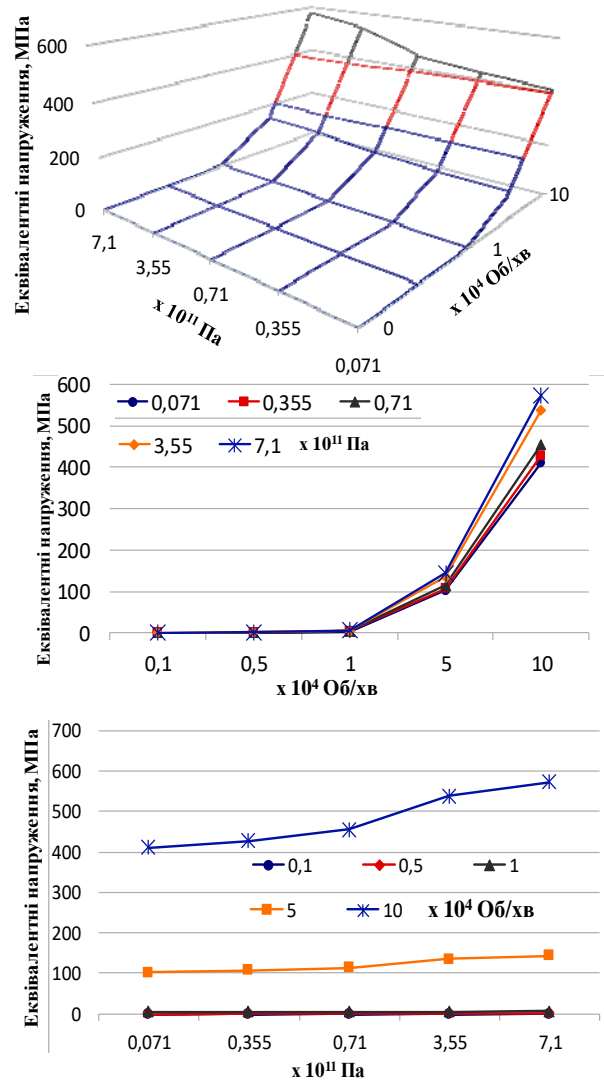


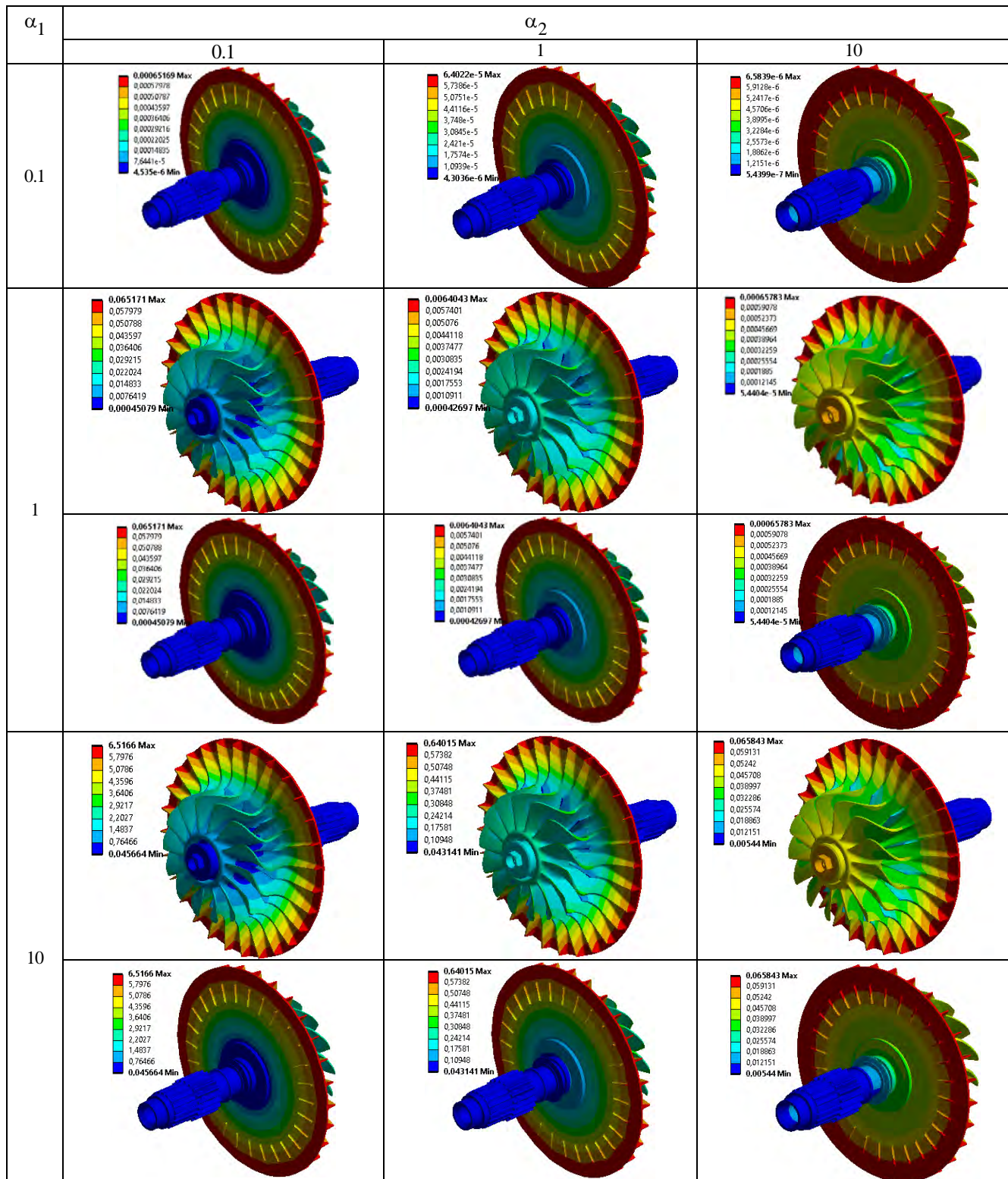
Рисунок 6 – Залежності рівня еквівалентних напружень за Мізесом, МПа, від варійованих швидкості обертання, об/хв., та модуля пружності матеріалу, Па

Критичні швидкості обертання роторної системи із консольним розташуванням робочого колеса. У ході досліджень варіюються: модуль пружності матеріалу робочого колеса (див. вище); густина матеріалу робочого колеса $\rho_3 \approx \rho$ (шляхом зміни коефіцієнта $\alpha_3 \in [0,1;10]$), контролюються перша та друга критичні швидкості обертання Ω_i : $\gamma_3(\alpha_i) = \Omega_1(\alpha_i) / \Omega_1(1)$;

$\gamma_4(\alpha_i) = \Omega_2(\alpha_i) / \Omega_2(1)$. На рис. 7–10 наведені поверхні відгуку γ_3, γ_4 в координатах (α_2, α_3) , а також відповідні залежності розмірних величин. Окрім залежностей інтегральних характеристик від варійованих параметрів досліджуваної роторної системи, інтерес становить також характер зміни її НДС та власних форм коливань. Інформація за цими напрямками зібрана у табл. 1–3.

Таблиця 1 – Розподіли повних переміщень u_{max} (мм) у досліджуваній роторній системі при варіюванні параметрів

α_1	α_2		
	0.1	1	10
0.1			



Аналіз отриманих результатів. Отримані результати дають основу для констатації таких особливостей чутливості міцнісних, жорсткісних та динамічних характеристик елементів роторної системи із консольним розташуванням робочого колеса.

1. Рівень напружень σ_{\max} та пружних переміщень u_{\max} змінюються від кутової швидкості обертання за залежністю, близькою до параболічної.

2. Рівень пружних переміщень достатньо сильно впливає на баланс переміщень у зазорі між статорною і роторною частиною.

3. Рівень напружень для певних режимів переважає механічні властивості алюмінієвих сплавів.

4. Критичні швидкості обертання зростають зі зростанням модуля пружності матеріалу робочого колеса та знижуються – при зростанні його густини.

Таблиця 2 – Розподіли еквівалентних напружень за Мізесом σ_{max} (МПа) у досліджуваній роторній системі при варіюванні параметрів α_1, α_2

α_1	α_2		
	0.1	1	10
0.1			
1			
10			

Таблиця 3 – Власні форми коливань у досліджуваній роторній системі при варіюванні параметрів α_1, α_2

α_1	α_2					
	0.1		1		10	
0.1	305.65 Гц		313.72 Гц		328.85 Гц	
1	308.72 Гц		316.52 Гц		331.65 Гц	
10	430.91 Гц		448.43 Гц		455.37 Гц	

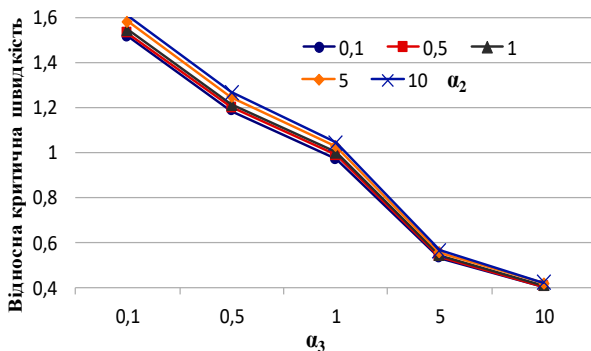
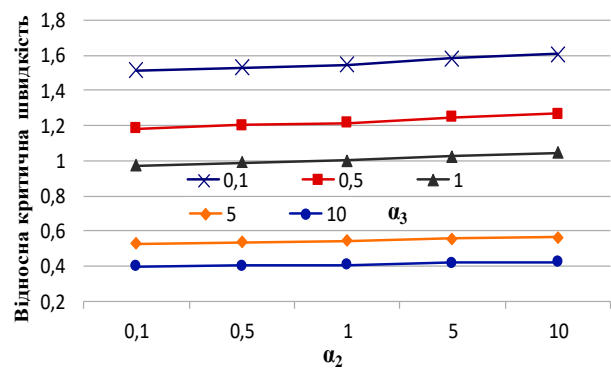
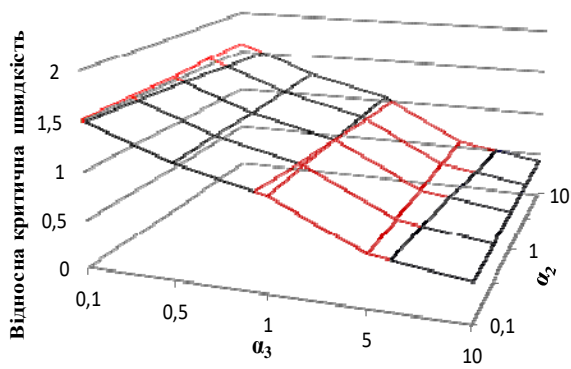


Рисунок 7 – Залежності $\gamma_3(\alpha_2, \alpha_3), \gamma_3(1, \alpha_3), \gamma_3(\alpha_2, 1)$

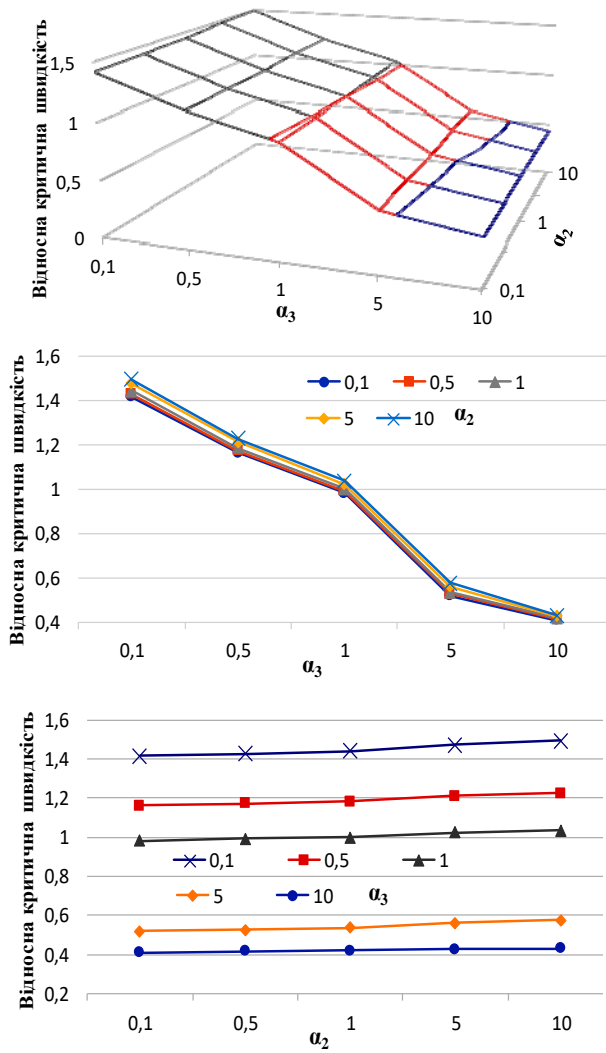


Рисунок 8 – Залежності $\gamma_4(\alpha_2, \alpha_3)$, $\gamma_4(1, \alpha_3)$, $\gamma_4(\alpha_2, 1)$

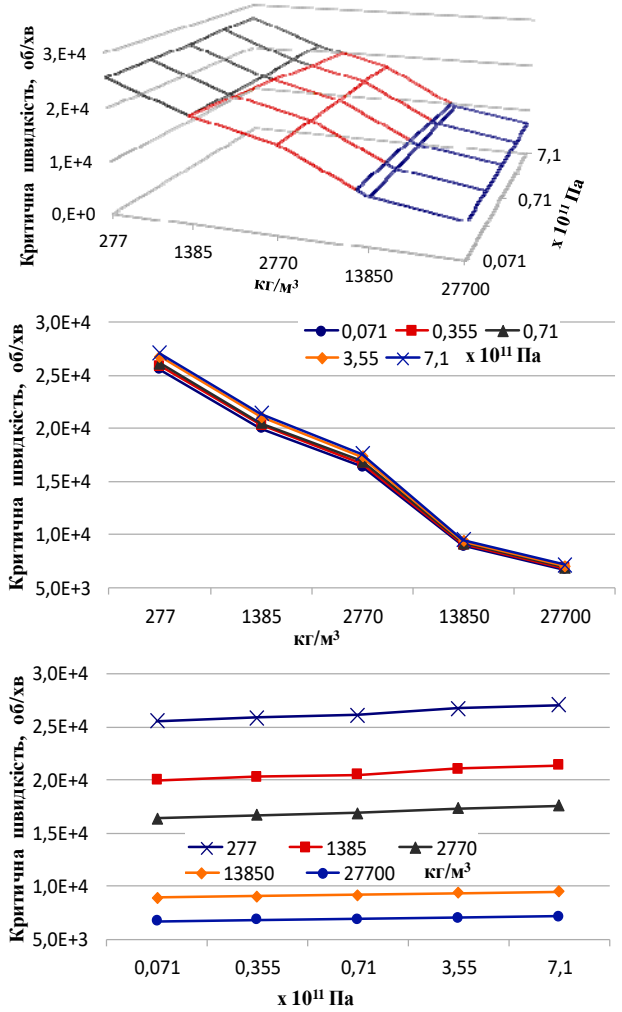


Рисунок 9 – Залежності критичної швидкості обертання, об/хв., від густини, кг/м^3 , та модуля пружності матеріалу, Па

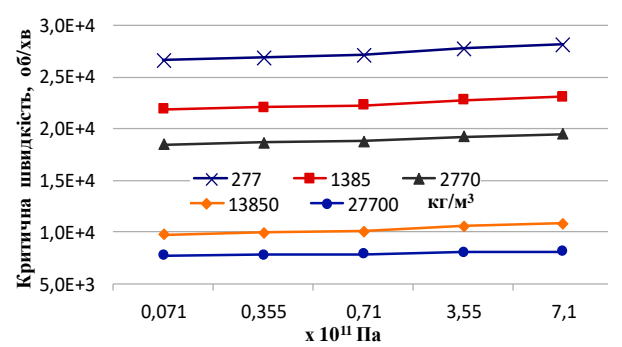
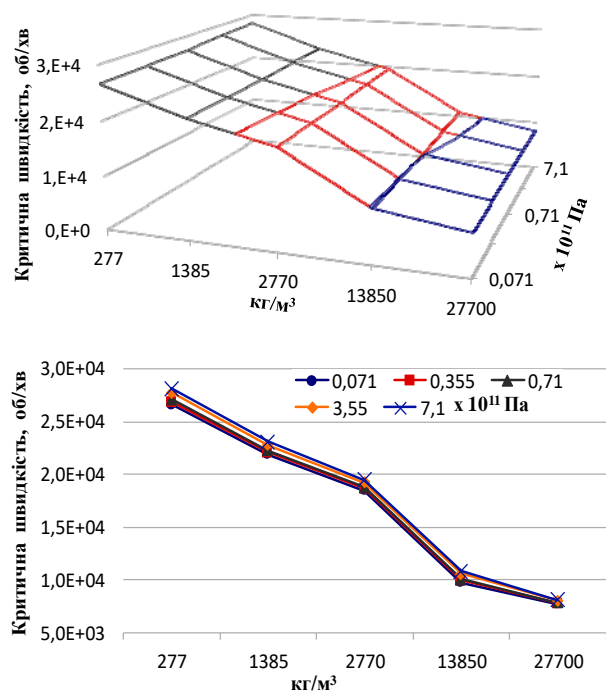


Рисунок 10 – Залежності другої критичної швидкості обертання, об/хв., від густини, кг/м^3 , та модуля пружності матеріалу, Па

Слід зауважити, що у випадку, який досліджується, варіювався модуль пружності матеріалу робочого колеса. Якби узгоджено варіювався також модуль пружності матеріалу вала, то напруження були би постійними.

Висновки.

1. Побудовані параметричні моделі дають можливість оцінювати міцнісні, жорсткісні та динамічні властивості елементів роторної системи із консольним розташуванням робочого колеса у залежності від варіювання проектних параметрів.

2. На відміну від традиційних критеріїв, для об'єктів типу роторних систем із консольним розташуванням робочого колеса введено до розгляду не один, а набір критеріїв, які мають бути враховані у ході досліджень подібного типу об'єктів. Це викликано тим, що для такого типу конструкцій важливими є не один, а комплекс чинників.

3. Крім аналізу чутливості різних характеристик до варіювання проектних параметрів можлива постановка обернених задач. Тобто можливе цілеспрямоване поліпшення варіантів технічних рішень за критеріями міцності, жорсткості та стійкості роторної системи із консольним розташуванням робочого колеса.

У подальшому розроблені підходи, методи та моделі дають можливість обґрунтовувати технічні рішення роторної системи із консольним розташуванням робочого колеса із високими характеристиками.

Список літератури

- Reddy, Mutra Rajasekhara, and J. Srinivas. "Vibration analysis of a support excited rotor system with hydrodynamic journal bearings." *Procedia Engineering* 144 (2016): 825-832.
- Han, Qinkai, and Fulei Chu. "Parametric instability of flexible rotor-bearing system under time-periodic base angular motions." *Applied Mathematical Modelling* 39, no. 15 (2015): 4511-4522.
- Avramov, K., M. Shulzhenko, O. Borysiuk, and Christophe Pierre. "Influence of periodic excitation on self-sustained vibrations of one disk rotors in arbitrary length journals bearings." *International journal of nonlinear mechanics* 77 (2015): 274-280.
- Cha, Matthew, and Sergei Glavatskih. "Nonlinear dynamic behaviour of vertical and horizontal rotors in compliant liner tilting pad journal bearings: Some design considerations." *Tribology International* 82 (2015): 142-152.
- Martynenko, G. "Resonance mode detuning in rotor systems employing active and passive magnetic bearings with controlled stiffness." *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 13 (2016): 3293.
- Azraai, M. R., G. Priyandoko, A. R. Yusoff, and M. F. F. A. Rashid. "Parametric Optimization of magneto-rheological fluid damper using particle swarm optimization." *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 11 (2015): 2591.
- Martynenko, G. "Application Of nonlinear models for a well-defined description of the dynamics of rotors in magnetic bearings." *Eureka: Physics and Engineering* 3 (2016): 3-12.
- Ran, Shaolin, Yefa Hu, Huachun Wu, and Xin Cheng. "Resonance Vibration Control for AMB Flexible Rotor System Based on μ -Synthesis Controller." *Mathematical Problems in Engineering* 2018 (2018).
- Zhang, Yipeng, Lidong He, Jianjiang Yang, Fangteng Wan, and Jinji Gao. "Vibration Control of an Unbalanced Single-Side Cantilevered Rotor System with a Novel Integral Squeeze Film Bearing Damper." *Applied Sciences* 9, no. 20 (2019): 4371.
- Deng, Huaxia, Yifan Diao, Jin Zhang, Peng Zhang, Mengchao Ma, Xiang Zhong, and Liandong Yu. "Three-dimensional identification for unbalanced mass of rotor systems in operation." *Applied Sciences* 8, no. 2 (2018): 173.
- Xu, Xiangbo, and Shao Chen. "Field balancing and harmonic vibration suppression in rigid AMB-rotor systems with rotor imbalances and sensor runout." *Sensors* 15, no. 9 (2015): 21876-21897.
- Zhang, Ao, Yan Bai, Bo Yang, and He Li. "Analysis of nonlinear vibration in permanent magnet synchronous motors under unbalanced magnetic pull." *Applied Sciences* 8, no. 1 (2018): 113.
- Martynenko G. Ju. Istorija, aktual'nye problemy, metody i sredstva analiza javlenij rotornoj dinamiki s uchetom tradicionnyh i magnitnyh podshipnikov. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Динаміка і міцність машин»*. 2014. 58(1100). Pp. 77–131.
- Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals.*- Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p. ISBN: 1856176339.
- Vasidzu K. *Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti*. M.: Mir, 1987. 542 s, il.

References (transliterated)

- Reddy, Mutra Rajasekhara, and J. Srinivas. "Vibration analysis of a support excited rotor system with hydrodynamic journal bearings." *Procedia Engineering* 144 (2016): 825-832.
- Han, Qinkai, and Fulei Chu. "Parametric instability of flexible rotor-bearing system under time-periodic base angular motions." *Applied Mathematical Modelling* 39, no. 15 (2015): 4511-4522.
- Avramov, K., M. Shulzhenko, O. Borysiuk, and Christophe Pierre. "Influence of periodic excitation on self-sustained vibrations of one disk rotors in arbitrary length journals bearings." *International journal of nonlinear mechanics* 77 (2015): 274-280.
- Cha, Matthew, and Sergei Glavatskih. "Nonlinear dynamic behaviour of vertical and horizontal rotors in compliant liner tilting pad journal bearings: Some design considerations." *Tribology International* 82 (2015): 142-152.
- Martynenko, G. "Resonance mode detuning in rotor systems employing active and passive magnetic bearings with controlled stiffness." *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 13 (2016): 3293.
- Azraai, M. R., G. Priyandoko, A. R. Yusoff, and M. F. F. A. Rashid. "Parametric Optimization of magneto-rheological fluid damper using particle swarm optimization." *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 11 (2015): 2591.
- Martynenko, G. "Application Of nonlinear models for a well-defined description of the dynamics of rotors in magnetic bearings." *Eureka: Physics and Engineering* 3 (2016): 3-12.
- Ran, Shaolin, Yefa Hu, Huachun Wu, and Xin Cheng. "Resonance Vibration Control for AMB Flexible Rotor System Based on μ -Synthesis Controller." *Mathematical Problems in Engineering* 2018 (2018).
- Zhang, Yipeng, Lidong He, Jianjiang Yang, Fangteng Wan, and Jinji Gao. "Vibration Control of an Unbalanced Single-Side Cantilevered Rotor System with a Novel Integral Squeeze Film Bearing Damper." *Applied Sciences* 9, no. 20 (2019): 4371.
- Deng, Huaxia, Yifan Diao, Jin Zhang, Peng Zhang, Mengchao Ma, Xiang Zhong, and Liandong Yu. "Three-dimensional identification for unbalanced mass of rotor systems in operation." *Applied Sciences* 8, no. 2 (2018): 173.
- Xu, Xiangbo, and Shao Chen. "Field balancing and harmonic vibration suppression in rigid AMB-rotor systems with rotor imbalances and sensor runout." *Sensors* 15, no. 9 (2015): 21876-21897.
- Zhang, Ao, Yan Bai, Bo Yang, and He Li. "Analysis of nonlinear vibration in permanent magnet synchronous motors under unbalanced magnetic pull." *Applied Sciences* 8, no. 1 (2018): 113.
- Martynenko G. Ju. Istorija, aktual'nye problemy, metody i sredstva analiza javlenij rotornoj dinamiki s uchetom tradicionnyh i magnitnyh podshipnikov. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Dy`namika i micznist' mashyn*. 2014. no 58(1100). Pp. 77–131.
- Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals.*- Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p. ISBN: 1856176339.
- Vasidzu K. *Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti*. M.: Mir, 1987. 542 p, il.

Надійшла (received) 22.03.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ткачук Микола Анатолійович (Ткачук Николай Анатольевич, Tkachuk Mykola A.) – доктор технічних наук,

професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Грабовський Андрій Володимирович (Грабовский Андрей Владимирович, Grabovskiy Andrey) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com.

Ткачук Микола Миколайович (Ткачук Николай Николаевич, Tkachuk Mykola M.) – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри інформаційних технологій та систем колісних і гусеничних машин імені О.О. Морозова; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4753-4267>; e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org

Прокопенко Микола Вікторович (Прокопенко Николай Викторович, Prokopenko Nickolay) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна.; тел.: (050) 754-41-35; e-mail: kola0123@ukr.net.

Шуть Олександр Юрійович (Шуть Александр Юрьевич, Shut Oleksandr) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна.

Ліпейко Андрій Іванович (Липейко Андрей Иванович, Lipeiko Andrii) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна, e-mail: tma@tmm-sapr.org

Литвин Борис Якович (Литвин Борис Яковлевич, Litvin Boris) - головний інженер ДП «Завод імені В. О. Малишева», м. Харків, Україна

Овчаров Єгор Миколайович (Овчаров Егор Николаевич, Ovcharov Egor) – головний конструктор КБ двигунобудування, ДП «Завод ім. В.О. Малишева»; м. Харків, Україна

Мосницька Дар'я Валеріївна (Мосницкая Дарья Валерьевна, Mosnitska Daria) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка гр. МІТ-87Б (ТМ), м. Харків, Україна; e-mail: s1710@tmm-sapr.org.