

*М. В. КУЧМА, Г. Ю. МАРТИНЕНКО*

## ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДИНАМІКИ РОТОРА ТУРБОКОМПРЕСОРА З АКТИВНИМИ МАГНІТНИМИ ПІДШИПНИКАМИ

Стаття досліджує та порівнює два підходи до моделювання та оцінки динаміки роторів у системах з активними магнітними підшипниками (АМП). Основний акцент робиться на аналізі динаміки ротора турбокомпресора газоперекачувального агрегату з врахуванням унікальних особливостей АМП, що використовуються для контролю стійкості руху. Для моделювання динаміки ротора на АМП використовуються два різні методи: перший – твердотільне моделювання, яке враховує деформацію навісних елементів ротора та їх вплив на його власні частоти та критичні швидкості; другий – масове або часткове моделювання, де всі навісні елементи заміщуються масово-інерційними елементами. Обидва підходи ґрунтуються на застосуванні методу скінченних елементів. Мета дослідження полягає в визначенні переваг та недоліків використання обох методів для моделювання та розрахунку характеристик роторної динаміки систем, які підтримуються АМП. Порівняння базується на різноманітних статичних та динамічних аналізах. Числові експерименти надають результати у вигляді розрахунків критичних швидкостей та форм коливань (прецесій). Це дозволяє оцінити можливість резонансних режимів системи та уникнення небезпечних ситуацій. Отримані результати підтверджують точність обох методів і можуть служити основою для вибору підходу в залежності від конкретних потреб дослідника.

**Ключові слова:** турбокомпресор, аналіз динаміки ротора, активний магнітний підшипник, пакет для загальної технічної інженерії.

*M. KUCHMA, G. MARTYNYENKO*

## SPECIFIC FEATURES OF MODELING AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF THE TURBOCHARGER ROTOR WITH ACTIVE MAGNETIC BEARINGS

This research paper studies and compares two approaches to modeling and estimating rotor dynamics in systems with active magnetic bearings (AMB). The main emphasis is laid on the analysis of the dynamics of the turbocharger rotor of a gas pumping unit taking into consideration the unique features of the AMB that are used to control a stable rotor motion. To model the dynamics of the AMB-based rotor, two different methods are used: the first is a solid-state modeling that takes into account the deformation of the hanging elements of the rotor and their effect on its natural frequencies and critical rate; the other method is a mass or partial modeling, where all suspended elements are replaced by mass-inertial elements. Both methods are based on the use of the method of final elements. The purpose of the research is to determine the advantages and drawbacks of both methods used for modeling and developing the characteristics of the rotor dynamics of the AMB-supported systems. The assessment is based on a variety of static and dynamic analyses. Numerical experiments produce the results in the form of the calculations of critical speeds and the type of vibrations (precessions). It enables the assessment of the potential of the resonant modes of the system and avoiding unsafe situations. The obtained results confirm the accuracy of both methods and can serve as a basis for choosing an approach meeting the specific needs of the researcher.

**Key words:** turbocharger, rotor dynamics analysis, active magnetic bearing, and general technical engineering package.

### Вступ

В даний час природний газ транспортується на великі відстані переважно за допомогою магістральних газопроводів, які використовують газоперекачувальні агрегати (ГПА) для підтримання необхідного тиску [1], [2]. Ці ГПА використовують одноконтурні або багатоконтурні відцентрові компресори для стиснення газу. Компресор є невід'ємною частиною роботи агрегатів та станцій, працюють безперервно і вимагають уваги як на етапі проектування, так і під час експлуатації [3], [4].

Відцентрові компресори, які входять до складу динамічних компресорів, досягають стиснення газу та підвищення тиску завдяки взаємодії потоку газу з рухомими лопатками. Обертання валу компресора зумовлене турбіною через з'єднання, і стиснення відбувається при проходженні газу через простори між лопатками за рахунок відцентрових сил. Ротор компресора, що складається з рухомих лопаткових дисків закріплений переважно на підшипниках ковзання із системами змащення або на активних магнітних підшипників (АМП) із системами управління [5] – [7].

Використання високотискових систем із масилом у підшипниках ковзання може бути недоліком через значну масу ротора та динамічні навантаження під час роботи. [8] – [10]. З цього приводу, АМП, засновані на принципах управління електромагнітним підвішуванням, представляють собою перспективну альтернативу [11] – [13].

Враховуючи складність систем ротор-АМП їх обертання та динамічні навантаження, вивчення динаміки ротора в АМП є дуже важливим [14], [15]. Точне визначення динамічних характеристик ротора, таких як власні частоти, критичні обертові швидкості та форми власних чи прецесійних вібрацій, є ключовим на етапах проектування та модернізації [16], [17]. Використання АМП для підтримки роторів включає алгоритмічний підхід для зменшення вібрацій та збуджень, що передбачає розробку математичних моделей для точного визначення критичних швидкостей та відповідних форм коливань ротора [18], [19]. Ці параметри впливають на амплітуди вимушених осциляцій ротора в зазорі АМП [20], [21].

### Мета роботи

Мета цього дослідження полягає у визначенні переваг та недоліків застосування різних методів моделювання та розрахунку характеристик динаміки роторів турбомашин з використанням активних магнітних підшипників за допомогою загального технічного інструменту. Для вирішення цієї проблеми проводяться обчислювальні експерименти статичного та динамічного аналізу на прикладі промислової турбомашини із використанням АМП. В даному випадку розглядається ротор двоконтурного турбокомпресора ГПА.

### Моделювання

Розглядається ротор двоконтурного турбокомпресора ГПА. Його схема показана на рис. 1.

Загальна довжина ротора становить приблизно 3 м, маса валу з навісними елементами – приблизно 1600 кг, діаметр дисків – приблизно 1,7 м. Два диски 2 розташовані посередині валу 1. Поруч з правим диском є думіс 3. Його призначення – зменшення аксіального навантаження на ротор від дії газу. Для підтримки використовуються два активних магнітних підшипника та один радіальний підшипник. Активні магнітні підшипники 4 розташовані з обох боків валу, а радіальний підшипник 5 – на правому боці. Напівмуфта 6 розташована на лівому кінці валу, використовується для з'єднання з ротором газотурбінного двигуна. Цей двигун і забезпечує обертання валу турбокомпресора на необхідну швидкість для створення певного рівня тиску на виході. Швидкість обертання ротора в робочому режимі становить 5000 об/хв.

Проведення аналізу динаміки ротора здійснюється за допомогою загально-технічного програмного пакету. Проте функціональність, пов'язана з системою керування, виходить за межі обсягу даного дослідження.

### Метод твердотільного моделювання

Була створена повна геометрична модель ротора ГПА за допомогою твердотільного методу моделювання. Ця модель показана на рис. 2.

Для створення скінченноелементної моделі ротору з навісними елементами використовувалися тривимірні десяти-вузлові тетрадральні скінченні елементи та метод вільного розбиття, який показано на рис. 3.

Властивості матеріалу відповідають сталі 1020.

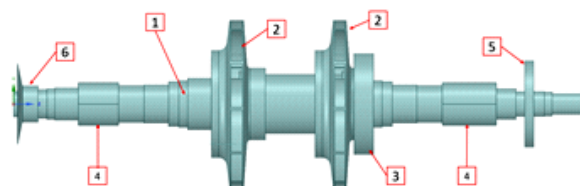


Рис. 1 – Ротор ГПА:

1 – вал; 2 – диски; 3 – думіс; 4 – АМП;  
5 – радіальні підшипник; 6 – напівмуфта

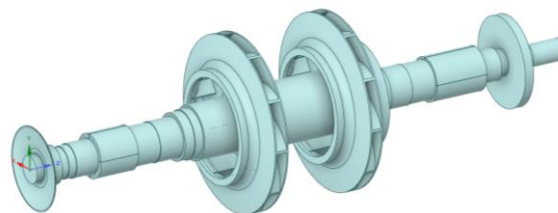


Рис. 2 – Твердотільна модель



Рис. 3 – Скінченноелементна модель

Для моделювання активних магнітних підшипників використовуються спеціальні скінченні елементи з пружно-демпфувальними характеристиками для кожного з підшипників. Їх загальна жорсткість була обрана відповідно до жорсткості магнітного підшипника в робочому режимі ( $3,75 \cdot 10^6$  Н/м).

Використання повної моделі ротора ГПА мало додаткову мету - отримання інерційних характеристик всіх навісних елементів для подальшого використання часткового методу моделювання.

### Метод часткового моделювання

Для проведення порівняльних розрахунків за допомогою того ж самого програмного пакету була створена часткова або масова модель ротора ГПА. У ній вал моделюється як твердільний об'єкт, а навісні елементи представлені масовими елементами з моментами інерції.

Особливістю даного підходу є використання масової скінченноелементної моделі для створення майже ідентичних аналізів. Але через відсутність геометричних моделей навісних елементів ротора то відповідно і відсутні режими вібрацій, пов'язаних з їх деформацією.

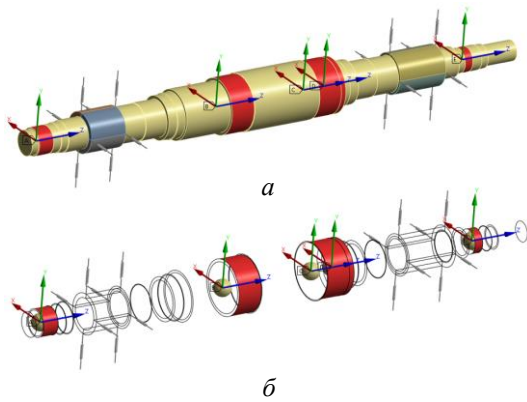


Рис. 4 – Масова модель:  
а – загальний вигляд; б – положення мас

Таблиця 1 – Масово інерційні параметри

Назва	Маса, кг	$I_x$ , кг·м <sup>2</sup>	$I_y$ , кг·м <sup>2</sup>	$I_z$ , кг·м <sup>2</sup>
Напівмуфта	10	0,069	0,069	0,119
Диск 1	157,9	7,069	7,069	12,724
Диск 2	157,2	6,983	6,983	12,64
Думіс	53,9	1,491	1,491	2,909
Радіальний підшипник	51	0,7	0,7	1,394

Таблиця 2 – Результати статичного аналізу

Метод	Максимальна деформація, м
Твердотільний	$5,5308 \cdot 10^{-6}$
Масовий	$5,9465e \cdot 10^{-6}$

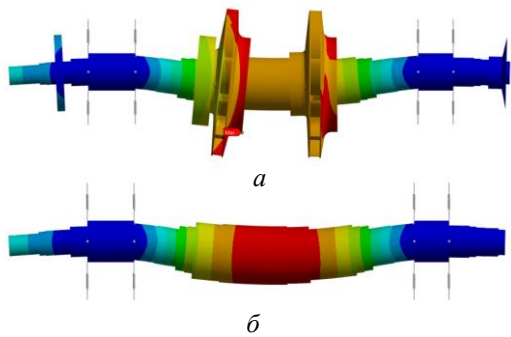


Рис. 5 – Результати статичного аналізу:  
а – твердотільний метод; б – масовий метод

Таблиця 3 – Результати модального аналізу

Форма коливань	Твердотільний метод, об/хв	Масовий метод, об/хв
Перша, безвузлова	8341	8144
Друга, безвузлова	8377	8178
Третя, з одним вузлом	21060	21143
Четверта, з одним вузлом	21120	21204
П'ята, з двома вузлами	24420	24480

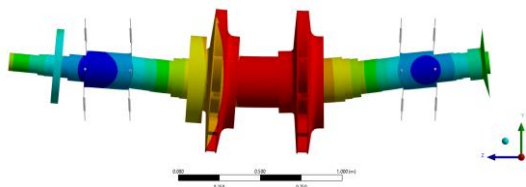


Рис. 6 – Перша форма коливань, безвузлова

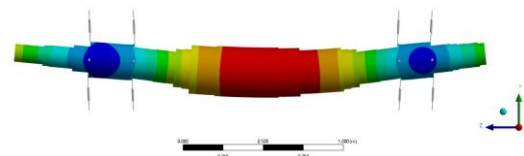


Рис. 9 – Перша форма коливань, безвузлова

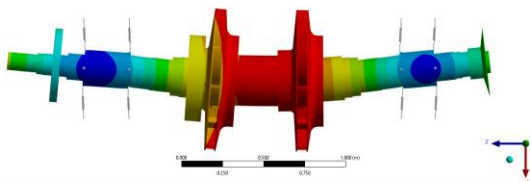


Рис. 7 – Друга форма коливань, безвузлова

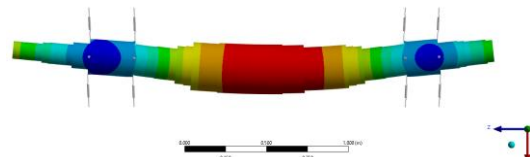


Рис. 10 – Друга форма коливань, безвузлова

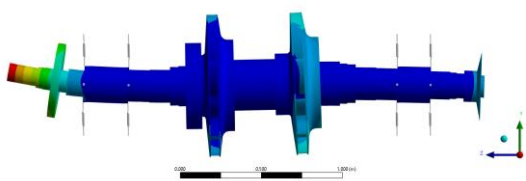


Рис. 8 – Третя форма коливань, з одним вузлом

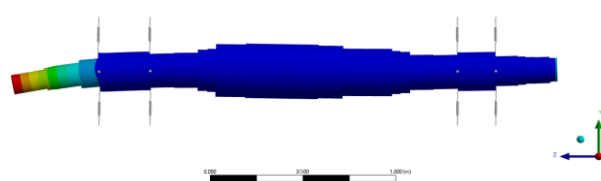


Рис. 11 – Третя форма коливань, з одним вузлом

Визначення інерційних параметрів рухомих елементів (мас та моментів інерції) проводилося під час виконання статичних розрахунків. Знайдені масово-інерційні параметри представлені в табл. 1, а масова модель самого ротора показана на рис. 4.

Активні магнітні підшипники, як і у попередньому методі, моделюються елементами з пружно-демпфувальними характеристиками з вищенаведеними значеннями жорсткості.

### Обговорення результатів

На першому етапі проводився статичний аналіз під дією лише власної ваги конструкції з абсолютно жорсткими опорами. Цей аналіз має на меті перевірити ідентичність моделей ротора, які побудовані різними методами. В табл. 2 порівнюються максимальні деформації в центрі валу які показані на рис. 5.

Критичні швидкості ротора можуть бути визначені з урахуванням або ігноруванням гіроскопічного моменту, враховуючи власні частоти та форми коливань, а також їх залежність від швидкості обертання ротора.

Модальний аналіз, проведений для двох методів, надає власні частоти та форми коливань ротора які представлені в табл. 3.

Відмінності в значеннях критичних швидкостей для власних форм коливань пов'язана із впливом деформацій навісних елементів.

Значення критичних швидкостей, отримані двома підходами моделювання, відрізняються не більше ніж на 1 %, що свідчить про високу точність результатів та підтверджує вірність розрахункових моделей. Крім того, точність скінченно-елементних моделей була перевірена порівнянням результатів статичних аналізів з різним розмірами скінченних елементів.

На рис. 6–8 показано форми коливань, отримані за допомогою повної, твердотільної моделі для аналізу роторної динаміки.

На рис. 9–11 показано форми коливань, отримані за допомогою часткової, масової моделі для аналізу роторної динаміки.

Порівняльний аналіз перших трьох режимів підтверджує точність моделювання.

### Висновки

Ця стаття досліджує повний статичний та динамічний аналізи ротора ГПА. Основний акцент робиться на використанні методів твердотільного та масового моделювання для аналізу роторної динаміки з додатковим врахуванням особливостей моделювання активних магнітних підшипників.

Метод твердотільного або повного моделювання використовується для детального моделю-

вання окремих компонентів таких як навісні елементи ротора в донному випадку. Це дозволяє більш точно враховувати вплив цих елементів на власні частоти та критичні швидкості в системі ротора. Результати, отримані за допомогою цього підходу, сприяють більш повному уявленню про динамічну поведінку системи.

З іншого боку, часткова масова модель досліджується через можливість прискорення обчислень. Ця модель спрощує генерацію частотних відгуків, що виникають внаслідок дисбалансу, та пришвидшує створення карти критичних швидкостей системи надаючи розуміння динамічних характеристик систем з фокусом на швидкість розрахунків.

Порівняльний аналіз цих двох підходів показує, що обидва методи надають високоточні результати при характеристиці динамічних процесів у системах роторів з активними магнітними підшипниками.

Як висновок вибір повним та частковим методами моделювання залежить від конкретних вимог та потреб проекту. Кожен метод має свої переваги, і рішення повинно ґрунтуватися на ретельному врахуванні факторів, таких як швидкість обчислень, рівень деталізації, і конкретні цілі проекту. Ця комплексна оцінка сприяє більш обґрунтованому процесу прийняття рішень, забезпечуючи відповідність обраного методу цілям конкретного проекту.

### Список літератури

1. Pătrășcioiu, C. Modelling and Simulation of Natural Gas Compression Plant / C. Pătrășcioiu, M. Popescu // 2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). – 2021. – P. 1–6. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ECAI52376.2021.9515118>.
2. Rozova, L. Information Technology in the Modeling of Dry Gas Seal for Centrifugal Compressors / L. Rozova, G. Martynenko // Proceedings of The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), Zaporizhzhia, Ukraine, April 27–May 1, 2020. – 2020. – Vol. 2608. – P. 536–546. – ISSN 1613-0073.
3. Stewart, M. Dynamic Compressors / M. Stewart // Surface Production Operations, Volume IV: Pump and Compressor Systems: Mechanical Design and Specification. – Gulf Professional Publishing, 2019. – 921 p. – ISBN 978-0-12-809895-0. – P. 527–653.
4. Kim, K. Dynamic Analysis of a Flexible Shaft in a Scroll Compressor Considering Solid Contact and Oil Film Pressure in Journal Bearings / K. Kim, G. Hong, G. Jang // International Journal of Refrigeration. – 2021. – Vol. 127. – P. 165–173. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.01.032>.
5. Siva Srinivas, R. Application of Active Magnetic Bearings in Flexible Rotordynamic Systems – A State-of-the-Art Review / R. Siva Srinivas, R. Tiwari, Ch. Kannababu // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – Vol. 106. – P. 537–572. – <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.01.010>.
6. Wan, Z. A Review of Active Magnetic Bearings Supported Systems Optimization Design. International Journal of Magnetics and Electromagnetism. – 2020. – Vol. 6, Is. 1. – P. 1–10. – ISSN 2631-5068. – DOI: <http://doi.org/10.35840/2631-5068/6527>.

7. Martynenko G. Analytical Method of the Analysis of Electromagnetic Circuits of Active Magnetic Bearings for Searching Energy and Forces Taking into Account Control Law / G. Martynenko // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek 2020), Kharkiv, Ukraine. – P. 86–91. – DOI: <http://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250138>.
8. Kandil, A. On the Nonlinear Dynamics of Constant Stiffness Coefficients 16-Pole Rotor Active Magnetic Bearings System / A. Kandil, M. Sayed, N. A. Saeed // *European Journal of Mechanics - A/Solids*. – 2020. – Vol. 84. – No. paper 104051. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104051>.
9. Martynenko, G. Numerical Determination of Active Magnetic Bearings Force Characteristics Taking into Account Control Laws Based on Parametric Modeling / G. Martynenko, V. Martynenko // 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES 2019), Kremenchuk, Ukraine. – P. 358–361. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896501>.
10. Kuznetsov, B. I. Multiobjective Synthesis of Two Degree of Freedom Nonlinear Robust Control by Discrete Continuous Plant / B. I. Kuznetsov, T. B. Nikitina, I. V. Bovdvi // *Technical Electrodynamics*. – 2020. – No. 5. – P. 10–14. – ISSN 1607-7970. – DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.010>.
11. Martynenko, G. Combined Rotor Suspension in Passive and Active Magnetic Bearings as a Prototype of Bearing Systems of Energy Rotary Turbomachines / G. Martynenko, Yu. Ulianov // 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES 2019), Kremenchuk, Ukraine. – 2019. – P. 90–93. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896571>.
12. Kuznetsov, B. High Voltage Power Line Magnetic Field Reduction by Active Shielding Means with Single Compensating Coil / B. Kuznetsov, A. Voloshko, I. Bovdvi, E. Vinichenko, B. Kobilyanskiy, T. Nikitina // 2017 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES 2017), Kremenchuk, Ukraine. – 2017. – P. 196–199. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248887>.
13. Martynenko, G. Parametric Numerical Analysis of Restoring Magnetic Forces Dependences in Radial Active Magnetic Bearings with a Given Control Law / G. Martynenko, V. Martynenko, I. Pidkurkova // 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES 2022), Kremenchuk, Ukraine. – 2022. – P. 1–6. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005766>.
14. Matsushita, O. Vibrations of Rotating Machinery: Volume 1. Basic Rotordynamics: Introduction to Practical Vibration Analysis / O. Matsushita, M. Tanaka, H. Kanki, M. Kobayashi, P. Keogh. – Springer Japan, Tokyo, 2017. – ISBN 978-4-431-55456-1. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55456-1>.
15. Matsushita, O. Vibrations of Rotating Machinery: Volume 2. Advanced Rotordynamics: Applications of Analysis, Troubleshooting and Diagnosis / O. Matsushita, M. Tanaka, M. Kobayashi, P. Keogh, H. Kanki. – Springer Japan, Tokyo, 2019. – ISBN 978-4-431-55453-0. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55453-0>.
16. Martynenko, G. Rotor Dynamics Modeling for Compressor and Generator of the Energy Gas Turbine Unit with Active Magnetic Bearings in Operating Modes / G. Martynenko, V. Martynenko // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodynamics. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine. – 2020. – P. 1–4. – DOI: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240781>.
17. Siva Srinivas, R. Modeling, Analysis, and Identification of Parallel and Angular Misalignments in a Coupled Rotor-Bearing-Active Magnetic Bearing System / R. Siva Srinivas, R. Tiwari, Ch. Kannababu // *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Transactions of the ASME. – 2021. – Vol. 143, Is. 1:011007, No paper DS-19-1160. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4048352>.
18. Ran, S. Design, Modeling, and Robust Control of the Flexible Rotor to Pass the First Bending Critical Speed with Active Magnetic Bearing / S. Ran, Y. Hu, H. Wu // *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. – Vol. 10, Is. 2. – P. 1–13. – DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018757536>.
19. Jiang Hao Dynamic Modeling of Magnetic Bearing-Rotor System on Moving Platform / Jiang Hao, Su Zhenzhong, Wang Dong // *Transactions of China Electrotechnical Society*. – 2019. – Vol. 34, Is. 23. – P. 4880–4889. – DOI: <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181510>. – URL: <https://dgjxb.ces-transaction.com/EN/abstract/abstract6164.shtml#> (дата звернення: 12.11.2023).
20. Saeed, N. A. F. Nonlinear Dynamics and Motion Bifurcations of the Rotor Active Magnetic Bearings System with a New Control Scheme and Rub-Impact Force / N. A. F. Saeed, E. Mahrous, E. A. Nasr, J. Awrejcewicz // *Symmetry*. – 2021. – Vol. 13, Is. 8. – DOI: <https://doi.org/10.3390/sym13081502>.
21. Shen, Z. Enhanced 3D Solid Finite Element Formulation for Rotor Dynamics Simulation / Z. Shen, B. Chouviou, F. Thouverez, A. Beley // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2021. – Vol. 195, No paper 103584. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2021.103584>.

#### References (transliterated)

1. Pătrășcioiu, C., Popescu M. (2021), “Modelling and Simulation of Natural Gas Compression Plant”, *2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/ECAI52376.2021.9515118>.
2. Rozova, L., Martynenko G. (2020), “Information Technology in the Modeling of Dry Gas Seal for Centrifugal Compressors”, *Proceedings of The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), Zaporizhzhia, Ukraine, April 27–May 1, 2020*, vol. 2608, pp. 536–546, ISSN 1613-0073.
3. Stewart, M. (2019), “Dynamic Compressors”, *Surface Production Operations, Volume IV: Pump and Compressor Systems: Mechanical Design and Specification*, Gulf Professional Publishing, 921 p, ISBN 978-0-12-809895-0, pp. 527–653.
4. Kim, K., Hong, G., Jang, G. (2021), “Dynamic Analysis of a Flexible Shaft in a Scroll Compressor Considering Solid Contact and Oil Film Pressure in Journal Bearings”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 127, pp. 165–173, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.01.032>.
5. Siva Srinivas, R., Tiwari, R., Kannababu Ch. (2018), “Application of Active Magnetic Bearings in Flexible Rotordynamic Systems – A State-of-the-Art Review”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 106, pp. 537–572, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.01.010>.
6. Wan, Z. (2020), “A Review of Active Magnetic Bearings Supported Systems Optimization Design”, *International Journal of Magnetism and Electromagnetism*, vol. 6, is. 1, pp. 1–10, ISSN 2631-5068, <http://doi.org/10.35840/2631-5068/6527>.
7. Martynenko G. (2020), “Analytical Method of the Analysis of Electromagnetic Circuits of Active Magnetic Bearings for Searching Energy and Forces Taking into Account Control Law”, *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek 2020), Kharkiv, Ukraine*, pp. 86–91, DOI: <http://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250138>.
8. Kandil, A., Sayed, M., Saeed, N. A. (2020), “On the Nonlinear Dynamics of Constant Stiffness Coefficients 16-Pole Rotor Active Magnetic Bearings System”, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, vol. 84, no. paper 104051, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104051>.
9. Martynenko, G., Martynenko, V. (2019), “Numerical Determination of Active Magnetic Bearings Force Characteristics Taking into Account Control Laws Based on Parametric Modeling”, *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES 2019), Kremenchuk, Ukraine*, pp. 358–361, <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896501>.
10. Kuznetsov, B. I., Nikitina, T. B., Bovdvi, I. V. (2020), “Multiobjective Synthesis of Two Degree of Freedom Nonlinear Robust Control by Discrete Continuous Plant”, *Technical Electro-*

- dynamics, no. 5, pp. 10–14, ISSN 1607-7970, <https://doi.org/10.15407/techmed2020.05.010>.
11. Martynenko, G., Ulianov, Yu. (2019), “Combined Rotor Suspension in Passive and Active Magnetic Bearings as a Prototype of Bearing Systems of Energy Rotary Turbomachines”, *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES 2019), Kremenchuk, Ukraine*, pp. 90–93, <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896571>.
  12. Kuznetsov, B., Voloshko, A., Bovdui, I., Vinichenko, E., Kobilyanskiy, B., Nikitina, T. (2017), “High Voltage Power Line Magnetic Field Reduction by Active Shielding Means with Single Compensating Coil”, *2017 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES 2017), Kremenchuk, Ukraine*, pp. 196–199, <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248887>.
  13. Martynenko, G., Martynenko, V., Pidkurkova, I. (2022), “Parametric Numerical Analysis of Restoring Magnetic Forces Dependences in Radial Active Magnetic Bearings with a Given Control Law”, *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES 2022), Kremenchuk, Ukraine*, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005766>.
  14. Matsushita, O., Tanaka, M., Kanki, H., Kobayashi, M., Keogh, P. (2017), *Vibrations of Rotating Machinery: Volume 1. Basic Rotordynamics: Introduction to Practical Vibration Analysis*, Springer Japan, Tokyo, ISBN 978-4-431-55456-1, <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55456-1>.
  15. Matsushita, O., Tanaka, M., Kanki, H., Kobayashi, M., Keogh, P. (2019), *Vibrations of Rotating Machinery: Volume 2. Advanced Rotordynamics: Applications of Analysis, Troubleshooting and Diagnosis*, Springer Japan, Tokyo, ISBN 978-4-431-55453-0, <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55453-0>.
  16. Martynenko, G., Martynenko, V. (2020), “Rotor Dynamics Modeling for Compressor and Generator of the Energy Gas Turbine Unit with Active Magnetic Bearings in Operating Modes”, *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine*, pp. 1–4, <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240781>.
  17. Siva Srinivas, R., Tiwari, R., Kannababu Ch. (2021), “Modeling, Analysis, and Identification of Parallel and Angular Misalignments in a Coupled Rotor-Bearing-Active Magnetic Bearing System”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, vol. 143, is. 1:011007, no paper DS-19-1160, <https://doi.org/10.1115/1.4048352>.
  18. Ran, S., Hu, Y., Wu, H. (2018), “Design, Modeling, and Robust Control of the Flexible Rotor to Pass the First Bending Critical Speed with Active Magnetic Bearing”, *Advances in Mechanical*, vol. 10, is. 2, pp. 1–13, <https://doi.org/10.1177/1687814018757536>.
  19. Jiang Hao, Su Zhenzhong, Wang Dong (2019), “Dynamic Modeling of Magnetic Bearing-Rotor System on Moving Platform”, *Transactions of China Electrotechnical Society*, vol. 34, is. 23, pp. 4880–4889, <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181510>, Access mode: <https://dgjxb.ces-transaction.com/EN/abstract/abstract6164.shtml#> (accessed 12 November 2023).
  20. Saeed, N. A. F., Mahrous, E., Nasr, E. A., Awrejcewicz, J. (2021), “Nonlinear Dynamics and Motion Bifurcations of the Rotor Active Magnetic Bearings System with a New Control Scheme and Rub-Impact Force”, *Symmetry*, vol. 13, is. 8, <https://doi.org/10.3390/sym13081502>.
  21. Shen, Z., Chouviou, B., Thouverez, F., Beley, A. (2021), “Enhanced 3D Solid Finite Element Formulation for Rotor Dynamics Simulation”, *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 195, no paper 103584, <https://doi.org/10.1016/j.finel.2021.103584>.

Надійшла (received) 14.12.2023

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Кучма Михайло Володимирович (Kuchma Mykhailo)** – аспірант кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії, Національний технічний університет «Харківський Політехнічний Інститут»; м. Харків; тел.: (099) 394–82–80; e-mail: ku4ma.m@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8061-2565>.

**Мартиненко Геннадій Юрійович (Martynenko Gennadii)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків; тел.: +38(057) 707-68-79; e-mail: gmartynenko@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5309-3608>.