

УДК 62-752.2: 621.822.5

Г. Ю. МАРТИНЕНКО

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНА СИМУЛЯЦІЯ ЯВИЩ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ ВІБРОГАСНОЇ ТА ВІБРОІЗОЛЮЮЧОЇ КОМПЛЕКСНОЇ ПАСИВНО-АКТИВНОЇ МАГНІТНОЇ ОПОРИ З ПОВОРОТНИМ АБО ОБЕРТОВИМ ВЕРТИКАЛЬНИМ ШТОК-ВАЛУМ

У статті розглядається спеціалізоване оригінальне комп'ютерне програмне забезпечення для розрахунку та аналізу параметрів динаміки шток-валу віброгасної та віброізолюючої комплексної повністю магнітної опори пасивно-активного типу з урахуванням різних типів магнітних елементів. Об'єктом дослідження є динаміка шток-валу, на якому віброізолюваний вантаж може розташовуватися зверху або знизу. Основною метою є моделювання та візуалізація нелінійних явищ динаміки цього шток-валу з урахуванням можливості його повороту або обертання, а також взаємопов'язаності електромагнітних та механічних керованих процесів. Представлення результатів у графічному та текстовому вигляді адаптовано для визначення динамічних характеристик та оцінки стійкості руху в нерезонансних, навіколорезонансних, резонансних та робочому віброізолюваному або віброгасному режимах. Математичний опис використовує аналітичну модель. Вона базується на диференціальних рівняннях Лагранжа-Максвелла у формі, подібній до рівнянь Рауса в механіці. При цьому реалізовано врахування нелінійних силових та жорсткісних характеристик як радіальних пасивних магнітних елементів опираючого, так і осьового керованого електромагнітного елемента опираючого в залежності від його параметрів та параметрів системи керування. Реалізація комп'ютерного моделювання та візуалізація нелінійних явищ динаміки шток-валу в магнітному полі була виконана за допомогою системи комп'ютерної математики у вигляді нелінійної імітаційно-обчислювальної моделі динаміки віброгасної та віброізолюючої комплексної пасивно-активної магнітної опори (ІОМ-ДВГВІМО-Н). Ця імітаційна модель має можливість побудови віброграм, спектрограм, траєкторій руху, фазових траєкторій та стробоскопічних перерізів Пуанкаре, а також тривимірних спектрів, амплітудно-частотних характеристик та залежностей амплітуд суб- та супергармонік від швидкості обертання та/або динамічного збудження для вибраних точок шток-валу. Верифікацію ІОМ-ДВГВІМО-Н було проведено шляхом порівняння симуляційних обчислювальних результатів з експериментальними даними для лабораторно-експериментального зразка віброгасної та віброізолюючої комплексної пасивно-активної магнітної опори.

Ключові слова: віброгасна та віброізолююча опора, пасивно-активний магнітний підвіс, динаміка шток-валу, нелінійні процеси та явища, математичне та комп'ютерне моделювання, імітаційно-обчислювальна модель.

G. YU. MARTYSENKO

MATHEMATICAL MODELING AND COMPUTER SIMULATION OF NONLINEAR DYNAMICS PHENOMENA IN A COMPLEX PASSIVE-ACTIVE VIBRATION-DAMPING AND VIBRATION-ISOLATING MAGNETIC SUPPORT WITH A SWIVELING OR ROTATING VERTICAL ROD-SHAFT

The article discusses specialized original computer software designed for calculating and analyzing the dynamics parameters of the rod-shaft in a vibration-damping and vibration-isolating complex fully magnetic support of the passive-active type, accounting for various types of magnetic elements. The object of the study is the dynamics of the rod-shaft, where a vibration-isolated real weight can be positioned either at the top or bottom. The primary goal is the modeling and visualization of nonlinear dynamics phenomena of this rod-shaft, considering the possibility of its swiveling or rotation, as well as the coupling of electromagnetic and mechanical controlled processes. The presentation of results in graphical and textual formats is adapted for determining dynamic characteristics and evaluating motion stability in non-resonant, near-resonant, resonant, and operational vibration-isolated or vibration-damping modes. The mathematical description utilizes an analytical model based on Lagrange-Maxwell differential equations in a form similar to Routh's equations in mechanics. This approach accounts for the nonlinear force and stiffness characteristics of both radial passive magnetic support elements and the axial controlled electromagnetic support element, depending on its parameters and the control system parameters. The implementation of computer modeling and visualization of the rod-shaft nonlinear dynamics phenomena in a magnetic field was carried out using a computer mathematics system in the form of a nonlinear simulation-computational model of the dynamics of a vibration-damping and vibration-isolating complex passive-active magnetic support (SCM-DVDVIMS-N). This simulation model enables the generation of vibrograms, spectrograms, motion trajectories, phase portraits, and stroboscopic Poincaré sections, as well as three-dimensional spectra, frequency response characteristics, and dependencies of sub- and superharmonic amplitudes on the rotation speed and/or dynamic excitation for selected points of the rod-shaft. Verification of SCM-DVIMS-N was performed by comparing simulation results with experimental data obtained from a laboratory prototype of the vibration-damping and vibration-isolating complex passive-active magnetic support.

Keywords: vibration-damping and vibration-isolating support, passive-active magnetic suspension, rod-shaft dynamics, nonlinear processes and phenomena, mathematical and computer modeling, simulation-computational model.

Вступ. Одним із головних питань при створенні та експлуатації машин...

Огляд літературних джерел інформації за тематикою. Для досягнення описаної мети застосовуються ...

а *б*
Рис. 1 – Принцип дії віброізолятора КНЖ: *а*) залежність сили F від переміщення x ; *б*) залежність жорсткості K від переміщення x

Мета та об'єкт досліджень. Метою досліджень є вивчення ...

Об'єктом досліджень є ...

Рис. 2 – Лабораторно-експериментальна установка комбінованого магнітно-електромагнітного підвісу модельного ротора

а *б*
Рис. 3 – Повний магнітно-електромагнітний підвіс модельного ротора:

a – структурна схема системи управління осьового АМП (осьової опори); *b* – силові характеристики радіальних ПМП

Рис. 4 – Моделі осьового упорного АМП (осьової опори):
a – геометрична модель із центрально розташованим диском; *b* – скінченноелементна модель зі зміщеним диском

Варіантне числове визначення і дослідження характеристик осьової керованої опори. Для розрахунку ...

(1)

a
b
в
г

Рис. 5 – Залежність характеристик осьової активної магнітної опори від переміщення диска при вихідних параметрах закону управління (○ – експериментальні та □ – розрахункові дані) з апроксимацією поліномом 3 та 5 ступеня (*a*, *b* та *в*, *г* відповідно):
a, *в* – магнітна сила; *b*, *г* – жорсткість

a
b

Рис. 6 – Залежність характеристик осьової активної магнітної опори від переміщення диска при різних параметрах закону управління:
a – магнітна сила; *b* – жорсткість

Концептуальне проектування віброгасної та віброізолюючої комплексної пасивно-активної магнітної опори. Результати розрахунків, подані на ...

Рис. 8 – Лабораторно-експериментальна установка віброгасної та віброізолюючої комплексної пасивно-активної магнітної опори

Висновки. Таким чином, отримані результати підтверджують ...

Фінансування. Автор хотів би подякувати Національному фонду досліджень України (грант №2023.03/0255) за підтримку і часткове фінансування.

Список літератури

1. De Silva C. W. *Vibration Damping, Control, and Design* / C. W. de Silva, ed. – CRC Press, 2007. – 634 p. doi: 10.1201/9781420053227
2. Mei C. *Mechanical Wave Vibrations: Analysis and Control* / C. Mei. – John Wiley and Sons Ltd., 2023. – 432 p.
3. Weber F. *Efficient Damping and Isolation Systems for Civil Structures* / F. Weber. – MDPI, 2023. – 194 p.
4. Kaul S. *Modeling and Analysis of Passive Vibration Isolation Systems* / S. Kaul, ed. – Elsevier, 2021. – 221 p.
5. Baz A. M. *Active and Passive Vibration Damping* / A. M. Baz. – Wiley, 2019. doi: 10.1002/9781118537619
6. Yusoff M.F.M. Development of empirical model for electromagnetic damping coefficient damper / M. F. M. Yusoff, A. Zaidi, S. Ishak, M. Awang, M. Md Din, A. Mukhtaruddin, M. Jefri, T. Sheng,

- A. Mukhtaruddin // *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. – 2023. – Vol. 20. – Pp. 10536-10546.
7. Zhang Q. Experimental study on the active control and dynamic characteristics of electromagnetic active-passive hybrid vibration isolation system / Q. Zhang, L. Zhu, Q. Dong, J. Sui, M. Sun, J. Wang, X. Yu // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2023. – Vol. 13(19). – 10565. doi: 10.3390/app131910565
8. Ma Z. Recent advances in quasi-zero stiffness vibration isolation systems: An overview and future possibilities / Z. Ma, R. Zhou, Q. Yang // *Machines*. – 2022. – Vol. 10(9), 813.
9. Martynenko G. Numerical simulation of warhead transportation / G. Martynenko, K. Avramov, V. Martynenko, M. Chernobryvko, A. Tonkonozhenko, V. Kozharin // *Defence Technology*. – 2021. – Vol. 17(2). – Pp. 478-494. doi: 10.1016/j.dt.2020.03.005
10. Thiagamani S. M. K. Vibration and Damping Behavior of Biocomposites / S. M. K. Thiagamani, M. Hoque, S. Krishnasamy, C. Muthukumar, S. Siengchin. – CRC Press, 2022. – 350 p.
11. Chang Y. Theoretical and experimental investigations on semi-active quasi-zero-stiffness dynamic vibration absorber / Y. Chang, J. Zhou, K. Wang, D. Xu // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2022. – Vol. 214. – 106892. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106892
12. Diez-Jimenez E. Review of passive electromagnetic devices for vibration damping and isolation / E. Diez-Jimenez, R. Rizzo, M. J. Gómez-García, E. Corral-Abad // *Shock and Vibration*. – 2019. – Vol. 2019. – Pp. 1-16. doi:10.1155/2019/1250707
13. Mohd Yusoff M. F. Simulation studies of vibration isolation using electromagnetic damper / M. F. Mohd Yusoff, A. M. Ahmad Zaidi, S. A. F. Ishak, M. K. Awang, M. F. Md Din // *Jurnal Kejuruteraan SI*, – 2021. – Vol. 4(2). – Pp. 119-126, doi: 10.17576/jkukm-2021-si4(2)-18
14. Martynenko G. Combined rotor suspension in passive and active magnetic bearings as a prototype of bearing systems of energy rotary turbomachines / G. Martynenko, Y. Ulianov // *Proceedings of the IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*. – 2019. – Pp. 90-93. doi:10.1109/MEES.2019.8896571
15. Volakis Jn. *Finite Element Method for Electromagnetics* / Jn. Volakis, A. Chatterjee, L. Kempel. – IEEE Press. – 1998. – 344 p.
16. Martynenko G. Stability testing of control algorithms for active magnetic bearings to measurement errors occurrence on scale model of turbocompressor / G. Martynenko, L. Rozova // *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*. – 2021. Pp. 1-6. doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598798
17. 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 // *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*. – 2020. Pp. 1-6.

References (transliterated)

1. De Silva C. W., ed. *Vibration Damping, Control, and Design*. CRC Press, 2007. 634 p. doi: 10.1201/9781420053227
2. Mei C. *Mechanical Wave Vibrations: Analysis and Control*. John Wiley and Sons Ltd., 2023. 432 p.
3. Weber F. *Efficient Damping and Isolation Systems for Civil Structures*. MDPI, 2023. 194 p.
4. Kaul S., ed. *Modeling and Analysis of Passive Vibration Isolation Systems*. Elsevier, 2021. 221 p. doi: 10.1016/c2019-0-00013-1
5. Baz A. M. *Active and Passive Vibration Damping*. Wiley, 2019.
6. Yusoff M.F.M., Zaidi A., Ishak S., Awang M., Md Din M., Mukhtaruddin A., Jefri M., Sheng T., Mukhtaruddin A. Development of empirical model for electromagnetic damping coefficient damper. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2023. Vol. 20. Pp. 10536-10546.
7. Zhang Q., Zhu L., Dong Q., Sui J., Sun M., Wang J., Yu X. Experimental study on the active control and dynamic characteristics of electromagnetic active-passive hybrid vibration isolation system. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2023, vol. 13(19). 10565.
8. Ma Z., Zhou R., Yang Q. Recent advances in quasi-zero stiffness vibration isolation systems: An overview and future possibilities. *Machines*, 2022, vol. 10(9), 813. doi: 10.3390/machines10090813
9. Martynenko G., Avramov K., Martynenko V., Chernobryvko M., Tonkonozhenko A., Kozharin V. Numerical simulation of warhead transportation. *Defence Technology*, 2021, vol. 17(2), pp. 478-494.
10. Thiagamani S. M. K., Hoque M., Krishnasamy S., Muthukumar C., Siengchin S. *Vibration and Damping Behavior of Biocomposites*. CRC Press, 2022. 350 p. doi: 10.1201/978100317362

11. Chang Y., Zhou J., Wang K., Xu D. Theoretical and experimental investigations on semi-active quasi-zero-stiffness dynamic vibration absorber. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022, vol. 214, 106892. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106892
12. Diez-Jimenez E., Rizzo R., Gómez-García M. J., Corral-Abad E. Review of passive electromagnetic devices for vibration damping and isolation. *Shock and Vibration*. 2019, vol. 2019, pp. 1-16.
13. Mohd Yusoff M. F., Ahmad Zaidi A. M., Ishak S. A. F., Awang M. K., Md Din M. F. Simulation studies of vibration isolation using electromagnetic damper. *Jurnal Kejuruteraan SI*. 2021, vol. 4(2), pp. 119-126, doi: 10.17576/jkukm-2021-si4(2)-18
14. Martynenko G., Ulianov Y. Combined rotor suspension in passive and active magnetic bearings as a prototype of bearing systems of energy rotary turbomachines. *Proceedings of the IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*. Kremenchuk, 2019, pp. 90-93. doi:10.1109/MEES.2019.8896571
15. Volakis Jn., Chatterjee A., Kempel L. *Finite Element Method for Electromagnetics*. New York: IEEE Press, 1998. 344 p.
16. Martynenko G., Rozova L. Stability testing of control algorithms for active magnetic bearings to measurement errors occurrence on scale model of turbocompressor. *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*. Kharkiv, 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598798
17. Martynenko G., Martynenko V. Rotor dynamics modeling for compressor and generator of the energy gas turbine unit with active magnetic bearings in operating modes. *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*. Kremenchuk, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240781

Надійшло (received) 30.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Мартиненко Геннадій Юрійович (Martynenko Gennadii Yuriyovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Gennadii.Martynenko@khpri.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5309-3608>.