

ABSTRACT AND REFERENCES

APPLIED PHYSICS

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.326676

IMPROVING AN ANALYTICAL MODEL OF THE NEAR MAGNETIC FIELD OF ELECTROMAGNETS IN THE SPACECRAFT ORIENTATION CONTROL SYSTEM (p. 6–14)**Andriy Getman**National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
Kharkiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2849-3575>**Oleksandr Konstantinov**National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
Kharkiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2660-4839>

The specificity of applying the technology for ensuring magnetic purity of small spacecraft, which have cylindrical electromagnets with a magnetic moment of 10–50 A m² in the orbit orientation control system, has been considered. It is shown that the electromagnets of the orientation control system are the most powerful source of magnetic hindrance with a magnetic flux density of up to 1 T for the magnetically sensitive equipment of the spacecraft. The need for modeling the magnetic field of the electromagnet at the preliminary stage of spacecraft development for the rational choice of its layout has been substantiated. In order to improve the technology for ensuring magnetic purity, which is aimed at increasing the reliability of spacecraft operation, a search for the best model of the magnetic field of such electromagnets was carried out.

A comparative analysis of approximate analytical models of the near magnetic field of a cylindrical electromagnet, which are based on its magnetic moment and overall dimensions, was carried out. It is established that the model based on two shifted dipole moments and the multipole model have unacceptably large deviations in the results of calculating the near magnetic field near the body of a cylindrical electromagnet. The advantages in the form of an expanded application area and a reduced deviation of the near magnetic field representation to 5 % when using the model based on cylindrical harmonics of the electromagnet have been theoretically substantiated. Formulas for engineering calculation of the magnetic field induced by a cylindrical electromagnet inside the spacecraft using its improved analytical model have been derived. It is proposed to use the model based on cylindrical harmonics for preliminary calculation of the magnetic hindrance generated by the electromagnets of the orientation control system to the magnetically sensitive equipment of the spacecraft.

Keywords: magnetic field, analytical model, cylindrical electromagnet, magnetic purity, spacecraft.

References

- ECSS-E-HB-20-07A. Space engineering: Electromagnetic compatibility hand-book. ESA-ESTEC (2012). Noordwijk: Requirements & Standards Division, 228.
- ECSS-E-HB-20-07C Rev.2. Space engineering: Electromagnetic compatibility hand-book. ESA-ESTEC (2022). Noordwijk, 116.
- Weikert, S., Mehlem, K., Wiegand, A. (2012). Spacecraft magnetic cleanliness prediction and control. ESA Workshop on Aerospace EMC. Available at: https://www.researchgate.net/publication/241633435_Spacecraft_magnetic_cleanliness_prediction_and_control
- Connerney, J. E. P., Benn, M., Bjarno, J. B., Denver, T., Espley, J., Jorgensen, J. L. et al. (2017). The Juno Magnetic Field Investigation. *Space Science Reviews*, 213 (1-4), 39–138. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0334-z>
- Lee, J., Jin, H., Kim, K.-H., Park, H., Jo, W., Jang, Y. et al. (2023). Correction of Spacecraft Magnetic Field Noise: Initial Korean Pathfinder Lunar Orbiter MAGnetometer Observation in Solar Wind. *Sensors*, 23 (23), 9428. <https://doi.org/10.3390/s23239428>
- de Soria-Santacruz, M., Soriano, M., Quintero, O., Wong, F., Hart, S., Kokorowski, M. et al. (2020). An Approach to Magnetic Cleanliness for the Psyche Mission. 2020 IEEE Aerospace Conference, 1–15. <https://doi.org/10.1109/aero47225.2020.9172801>
- Arranz, C. J., Marchese, V., Léger, J.-M., Vallmitjana, M., Jager, T., Pous, M. (2023). Magnetic cleanliness on NanoMagSat, a CubeSats' constellation science mission. 2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, 1–6. <https://doi.org/10.1109/emceurope57790.2023.10274205>
- Park, H. H., Jin, H., Kim, T. Y., Kim, K. H., Lee, H. J., Shin, J. H. et al. (2022). Analysis of the KPLO magnetic cleanliness for the KMAG instrument. *Advances in Space Research*, 69 (2), 1198–1204. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.015>
- Mentges, A., Rawal, B. S. (2022). Magnetic Dipole Moment Estimation from Nearfield Measurements Using Stochastic Gradient Descent AI Model. 2022 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COM-IT-CON), 327–332. <https://doi.org/10.1109/com-it-con54601.2022.9850855>
- Busch, S., Koss, P. A., Horch, C., Schäfer, K., Schimmerohn, M., Schäfer, F., Kühnemann, F. (2023). Magnetic cleanliness verification of miniature satellites for high precision pointing. *Acta Astronautica*, 210, 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.05.017>
- Dorman, C. J., Piker, C., Miles, D. M. (2024). Automated static magnetic cleanliness screening for the TRACERS small-satellite mission. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 13 (1), 43–50. <https://doi.org/10.5194/gi-13-43-2024>
- Pudney, M. A., Carr, C. M., Schwartz, S. J., Howarth, S. I. (2013). Near-magnetic-field scaling for verification of spacecraft equipment. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2 (2), 249–255. <https://doi.org/10.5194/gi-2-249-2013>
- Getman, A. (2023). Improving the technology for ensuring the magnetic cleanliness of small spacecraft. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (5 (123)), 33–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282444>
- Lassakeur, A., Underwood, C. (2019). Magnetic Cleanliness Program on CubeSats for Improved Attitude Stability. 2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), 123–129. <https://doi.org/10.1109/rast.2019.8767816>
- Belsten, N. (2022). Magnetic Cleanliness, Sensing, and Calibration for CubeSats. Massachusetts Institute of Technology. Available at: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/143167>
- Vanderlinde, J. (2005). *Classical Electromagnetic Theory*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2700-1>
- Smythe, W. (1989). *Static and Dynamic Electricity*. Hemisphere Publishing Corporation, 623.

18. Getman, A. V., Konstantinov, A. V. (2013). Cylindrical harmonics of magnetic field of linear magnetized cylinder. *Technical Electrodynamics*, 1, 3–8. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/62253>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.327021

IMPROVING ACCURACY OF THE SPECTRAL-CORRELATION DIRECTION FINDING AND DELAY ESTIMATION USING MACHINE LEARNING (p. 15–24)

Nurzhigit Smailov

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering
named after Academician U. A. Dzholdasbekov,
Almaty, Republic of Kazakhstan
Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Vitaliy Tsyporenko

Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8559-006X>

Zhomart Ualiyev

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering
named after Academician U. A. Dzholdasbekov,
Almaty, Republic of Kazakhstan
Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5021-2154>

Ainur Issova

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering
named after Academician U. A. Dzholdasbekov,
Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0354-2692>

Zhandos Dosbayev

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering
named after Academician U. A. Dzholdasbekov,
Almaty, Republic of Kazakhstan
Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1673-4036>

Yerlan Tashtay

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2936-1673>

Maigul Zhekambayeva

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0612-6336>

Temirlan Alimbekov

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4104-260X>

Rashida Kadyrova

Almaty Academy of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan
named after Makana Esbulatova, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5120-6932>

Akezhan Sabibolda

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering
named after Academician U. A. Dzholdasbekov,
Almaty, Republic of Kazakhstan
Almaty Academy of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan
named after Makana Esbulatova, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1186-7940>

The object of the study is the process of radio signal delay and direction estimation using digital spectral-correlation analysis enhanced by machine learning. This process is essential for high-accuracy direction finding in electromagnetic monitoring systems. The problem addressed is the low adaptability and insufficient accuracy

of traditional direction finding methods under variable signal conditions, especially due to manual parameter selection and the computational complexity of correlation processing.

The essence of the obtained results is a machine learning-based method for predicting radio signal parameters (delay and angle), which reduced the standard deviation of direction finding estimates to 0.08–0.026° and delay estimation error to 1.5–14.8 μs across a signal-to-noise ratio range of 9 to 37 dB. These results are supported by averaging over 1000 realizations using Monte Carlo simulation, confirming their stability under noise. Due to its distinctive features, the proposed solution addressed the problem by enabling automated selection of processing parameters through a trained neural network that adapts to nonlinear signal characteristics, minimizing the need for manual adjustment or exhaustive search.

These results are explained by the model's ability to identify hidden dependencies between signal parameters and processing outcomes, enabling adaptive behavior and reduced deviations. Although no computational complexity assessment is provided, prediction-based parameter estimation is expected to improve processing speed in future implementations. The results can be applied in real-time electromagnetic monitoring, radio surveillance, and defense applications, especially under limited computing resources or varying noise conditions.

Keywords: spectral-correlation analysis, radio signal monitoring, signal parameter prediction, direction finding accuracy.

References

- Rembovskij, A. M. (2015). *Radio monitoring – tasks, methods, means*. Moscow: Hot line. Telekom, 640.
- Tsyporenko, V., Tsyporenko, V., Andreiev, O., Sabibolda, A. (2021). Digital spectral correlation method for measuring radio signal reception delay and direction finding. *Technical Engineering*, 2 (88), 113–121. [https://doi.org/10.26642/ten-2021-2\(88\)-113-121](https://doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-113-121)
- Elbir, A. M. (2017). Direction Finding in the Presence of Direction-Dependent Mutual Coupling. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 1541–1544. <https://doi.org/10.1109/lawp.2017.2647983>
- Tsyporenko, V. V., Tsyporenko, V. G., Nikitzuk, T. M. (2019). Optimization of direct digital method of correlative-interferometric direction finding with reconstruction of spatial analytical signal. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 3, 15–24. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-3-2>
- Duploury, J., Morlaas, C., Aubert, H., Potier, P., Pouliguen, P. (2019). Wideband Vector Antenna for Dual-Polarized and Three-Dimensional Direction-Finding Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18 (8), 1572–1575. <https://doi.org/10.1109/lawp.2019.2923531>
- Lee, J.-H., Kim, J.-K., Ryu, H.-K., Park, Y.-J. (2018). Multiple Array Spacings for an Interferometer Direction Finder With High Direction-Finding Accuracy in a Wide Range of Frequencies. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17 (4), 563–566. <https://doi.org/10.1109/lawp.2018.2803107>
- Xie, X., Xu, Z. (2018). Direction Finding of BPSK Signals Using Time-Modulated Array. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 28 (7), 618–620. <https://doi.org/10.1109/lmwc.2018.2834523>
- Cai, J., Zhou, H., Huang, W., Wen, B. (2021). Ship Detection and Direction Finding Based on Time-Frequency Analysis for Compact HF Radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 18 (1), 72–76. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2020.2967387>

9. He, C., Liang, X., Li, Z., Geng, J., Jin, R. (2015). Direction Finding by Time-Modulated Array With Harmonic Characteristic Analysis. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 642–645. <https://doi.org/10.1109/lawp.2014.2373432>
10. Rosado-Sanz, J., Jarabo-Amores, M. P., De la Mata-Moya, D., Rey-Maestre, N. (2022). Adaptive Beamforming Approaches to Improve Passive Radar Performance in Sea and Wind Farms' Clutter. *Sensors*, 22 (18), 6865. <https://doi.org/10.3390/s22186865>
11. Smailov, N., Tsyporenko, V., Sabibolda, A., Tsyporenko, V., Kabdoldina, A., Zhekambayeva, M. et al. (2023). Improving the accuracy of a digital spectral correlation-interferometric method of direction finding with analytical signal reconstruction for processing an incomplete spectrum of the signal. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (9 (125)), 14–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288397>
12. Sabibolda, A., Tsyporenko, V., Smailov, N., Tsyporenko, V., Abdykadyrov, A. (2024). Estimation of the Time Efficiency of a Radio Direction Finder Operating on the Basis of a Searchless Spectral Method of Dispersion-Correlation Radio Direction Finding. *Advances in Asian Mechanism and Machine Science*, 62–70. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0_8
13. Kuttybayeva, A., Sabibolda, A., Kengesbayeva, S., Baigulbayeva, M., Amir, A., Sekenov, B. (2024). Investigation of a Fiber Optic Laser Sensor with Grating Resonator Using Mirrors. *2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon)*, 709–711. <https://doi.org/10.1109/elcon61730.2024.10468264>
14. Smailov, N., Tsyporenko, V., Sabibolda, A., Tsyporenko, V., Abdykadyrov, A., Kabdoldina, A. et al. (2024). Usprawnienie cyfrowego korelacyjno-interferometrycznego ustalania kierunku za pomocą przestrzennego sygnału analitycznego. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 14 (3), 43–48. <https://doi.org/10.35784/iapgos.6177>
15. Abdykadyrov, A., Smailov, N., Sabibolda, A., Tolen, G., Dosbayev, Z., Ualiyev, Z., Kadyrova, R. (2024). Optimization of distributed acoustic sensors based on fiber optic technologies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (131)), 50–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313455>
16. Marxuly, S., Abdykadyrov, A., Chezhibayeva, K., Smailov, N. (2024). Study of the ozone control process using electronic sensors. *Informatyka Automatyka Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 14 (4), 38–45. <https://doi.org/10.35784/iapgos.6051>
17. Podchashynskiy, Y., Luhovyykh, O., Tsyporenko, V., Tsyporenko, V. (2021). Devising a method for measuring the motion parameters of industrial equipment in the quarry using adaptive parameters of a video sequence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (9 (114)), 32–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.248624>
18. Zahoruiko, L., Martianova, T., Al-Hiari, M., Polovenko, L., Kovalchuk, M., Merinova, S. et al. (2024). Model matematyczny i struktura sieci neuronowej do wykrywania cyberataków na systemy teleinformatyczne i komunikacyjne. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 14 (3), 49–55. <https://doi.org/10.35784/iapgos.6155>
19. Mummaneni, S., Dodda, P., Ginjupalli, N. D. (2024). Inspirowane kotami podejście do przewidywania tocznia rumieniowatego układu z wykorzystaniem sieci neuronowych. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 14 (2), 22–27. <https://doi.org/10.35784/iapgos.6077>
20. Rayavarapu, S. M., Tammineni, S. P., Gottapu, S. R., & Singam, A. (2024). Przegląd generatywnych sieci przeciwstawnych dla zastosowań bezpieczeństwa. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 14 (2), 66–70. <https://doi.org/10.35784/iapgos.5778>
21. Stelmakh, N., Mandrovska, S., Galagan, R. (2024). Zastosowanie sieci neuronowych resnet-152 do analizy obrazów z uav do wykrywania pożaru. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 14 (2), 77–82. <https://doi.org/10.35784/iapgos.5862>
22. Lyfar, V., Lyfar, O., Zynchenko, V. (2024). Metody inteligentnej analizy danych z wykorzystaniem sieci neuronowych w diagnostyce. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 14 (2), 109–112. <https://doi.org/10.35784/iapgos.5746>
23. Limtrakul, S., Wetweeraopong, J. (2023). An enhanced differential evolution algorithm with adaptive weight bounds for efficient training of neural networks. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 13 (1), 4–13. <https://doi.org/10.35784/iapgos.3366>
24. Bilynsky, Y., Nikolsky, A., Revenok, V., Pogorilyi, V., Smailova, S., Voloshina, O., Kumargazhanova, S. (2023). Convolutional neural networks for early computer diagnosis of child dysplasia. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 13 (2), 56–63. <https://doi.org/10.35784/iapgos.3499>
25. Michalska-Ciekańska, M. (2022). Głębokie sieci neuronowe dla diagnostyki zmian skórnych. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 12 (3), 50–53. <https://doi.org/10.35784/iapgos.3042>
26. Gęca, J. (2020). Performance comparison of machine learning algorithms for predictive maintenance. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 10 (3), 32–35. <https://doi.org/10.35784/iapgos.1834>
27. Smailov, N., Batyrgaliyev, A., Akhmediyarova, A., Seilova, N., Koshkinbayeva, M., Baigulbayeva, M. et al. (2020). Approaches to Evaluating the Quality of Masking Noise Interference. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 67 (01), 59–64. <https://doi.org/10.24425/ijet.2021.135944>
28. Li, R., Zhao, L., Liu, C., Bi, M. (2022). Strongest Angle-of-Arrival Estimation for Hybrid Millimeter Wave Architecture with 1-Bit A/D Equipped at Transceivers. *Sensors*, 22 (9), 3140. <https://doi.org/10.3390/s22093140>
29. Wang, J., Wang, P., Zhang, R., Wu, W. (2022). SDFnT-Based Parameter Estimation for OFDM Radar Systems with Inter-carrier Interference. *Sensors*, 23 (1), 147. <https://doi.org/10.3390/s23010147>
30. Ren, B., Wang, T. (2022). Space-Time Adaptive Processing Based on Modified Sparse Learning via Iterative Minimization for Conformal Array Radar. *Sensors*, 22 (18), 6917. <https://doi.org/10.3390/s22186917>
31. Jwo, D.-J., Cho, T.-S., Demssie, B. A. (2025). Dynamic Modeling and Its Impact on Estimation Accuracy for GPS Navigation Filters. *Sensors*, 25 (3), 972. <https://doi.org/10.3390/s25030972>
32. Smailov, N., Uralova, F., Kadyrova, R., Magazov, R., Sabibolda, A. (2025). Optymalizacja metod uczenia maszynowego do deanonimizacji w sieciach społecznościowych. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 15 (1), 101–104. <https://doi.org/10.35784/iapgos.7098>
33. Wang, H., Yu, Z., Wen, F. (2024). Computationally Efficient Direction Finding for Conformal MIMO Radar. *Sensors*, 24 (18), 6065. <https://doi.org/10.3390/s24186065>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.327905

MULTI-LEVEL PROCESSING OF VIBROACOUSTIC SIGNALS FOR IMPROVING THE DIAGNOSTICS OF GAS TURBINE ENGINES (p. 25–33)

Nadiia Bouraou

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6848-816X>

Olha Pazdrii

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8970-5079>

Oleksandr Povchenko

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2998-5950>

The object of this study is the process of monitoring the technical condition of an aircraft gas turbine engine (GTE). One of the most dangerous causes of accidents is damage caused by foreign objects, in particular small metal particles, hailstones, bolts, fuselage fragments, etc., entering the engine turbine during flight or during takeoff and landing.

The task addressed was to improve the methods of gas turbine engine vibroacoustic diagnostics, which would increase its sensitivity to small changes in diagnostic signals caused by the ingress of small foreign objects into the engine turbine. To solve this problem, it has been proposed to use multi-level processing of vibration signals obtained as a result of physical modeling of the rotating system (RS) and simulation of the ingress of small foreign objects.

Multi-level processing combines the use of time-frequency, bispectral, and fractal analysis methods to determine the quantitative integrated diagnostic indicator – Minkowski dimensionality. The following average values of Minkowski dimensionality were obtained for the estimates of the bispectral modulus: without external influence – 1.075; ingress of small foreign objects – 1.01; friction of the blades against a foreign object as a result of its ingress into the RS turbine – 1.21.

It has been established that an increase in the Minkowski dimensionality indicates the development of an operational disturbance caused by the ingress of foreign objects, even very small ones.

This paper reports experimental confirmation of the effectiveness of using multi-level processing of vibration signals for diagnosing operational disturbances due to the ingress of foreign objects into RS.

It has been established that multi-level processing makes it possible to detect hidden trends in a noisy signal that are difficult to detect using conventional processing methods.

Keywords: gas turbine engine, foreign object ingestion, signal processing, fractal analysis.

References

- Bouraou, N. (2023). Methodology of Vibroacoustic Monitoring and Diagnosis of Initial Damage of Elements of Rotating Systems. *Advanced System Development Technologies I*, 311–344. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3_9
- Rossmann, A. (2015). Aircraft turbine engine safety volume 4B: Problem. Oriented technology for professionals. Axel Rossmann Turboconsult, 434.
- Sharma, R., Singh, S., Singh, A. K. (2018). Foreign Object Damage Investigation of a Bypass Vane of an Aero-engine. *Materials Today: Proceedings*, 5 (9), 17717–17724. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.094>
- Strack, W., Zhang, D., Turso, J., Pavlik, W., Lopez, I. (2005). Foreign object damage identification in turbine engines. NASA/TM-2005-213588. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/24330663>
- Madhavan, S., Jain, R., Sujatha, C., Sekhar, A. S. (2014). Vibration based damage detection of rotor blades in a gas turbine engine. *Engineering Failure Analysis*, 46, 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.07.021>
- Tsai, G.-C. (2004). Rotating vibration behavior of the turbine blades with different groups of blades. *Journal of Sound and Vibration*, 271 (3–5), 547–575. [https://doi.org/10.1016/s0022-460x\(03\)00280-3](https://doi.org/10.1016/s0022-460x(03)00280-3)
- Kriston, B. J., Jálcs, K. (2021). Application of vibro-acoustic methods in failure diagnostics. *Journal of Physics: Conference Series*, 1935 (1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1935/1/012002>
- Doshi, S., Katoch, A., Suresh, A., Razak, F. A., Datta, S., Madhavan, S. et al. (2021). A Review on Vibrations in Various Turbomachines such as Fans, Compressors, Turbines and Pumps. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 9 (7), 1557–1575. <https://doi.org/10.1007/s42417-021-00313-x>
- Pazdrii, O., Bouraou, N. (2020). Vibroacoustic condition monitoring of the complex rotation system based on multilevel signal processing. *Vibrations in Physical Systems*, 31 (2). <https://doi.org/10.21008/j.0860-6897.2020.2.24>
- Bouraou, N. I., Ignatovich, S. R., Pazdrii, O. Ya. (2018). Using fractal analysis of the time-frequency spectra of vibroacoustical signals for diagnostic of gas-turbine engines. *Visnyk NTUU KPI Seriia – Radiotekhnika Radioaparobuduvannia*, 74, 73–83. <https://doi.org/10.20535/radap.2018.74.73-83>
- Mishra, R. K., Srivastav, D. K., Srinivasan, K., Nandi, V., Bhat, R. R. (2014). Impact of Foreign Object Damage on an Aero Gas Turbine Engine. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 15 (1), 25–32. <https://doi.org/10.1007/s11668-014-9914-3>
- Turso, J. A., Litt, J. S. (2005). A Foreign Object Damage Event Detector Data Fusion System for Turbofan Engines. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2 (7), 291–308. <https://doi.org/10.2514/1.12348>
- Yang, S., Du, T., Zhang, X., Ma, L., Zhang, G. (2023). Effect of foreign object damage on vibration fatigue crack propagation of blades. *Binggong Xuebao/Acta Armamentarii*, 44 (6), 1713–1721. <https://doi.org/10.12382/bgxb.2022.0109>
- Sopilka, Yu. V. (2005). Vykorystannia chastotnochasovykh peretvoren Vihnera vyshchykh poriadkiv u zadachakh vibroakustychnoi diahnostryky. *Naukovi visti NTUU "KPI"*, 6, 110–117.
- Bouraou, N. I., Protasov, A. G., Sopilka, Y. V., Zazhitsky, O. V. (2005). Decision making of aircraft engine blades condition based on bispectral analysis of the vibroacoustical signal. *AIP Conference Proceedings*, 760 (1), 760–766. <https://doi.org/10.1063/1.1916751>
- Ma, H., Wu, Z., Zeng, J., Wang, W., Wang, H., Guan, H., Zhang, W. (2023). Review on Dynamic Modeling and Vibration Characteristics of Rotating Cracked Blades. *Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics*. <https://doi.org/10.37965/jdmd.2023.465>
- Samadani, M., Kitio Kwuimy, C. A., Nataraj, C. (2015). Model-based fault diagnostics of nonlinear systems using the features of the phase space response. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 20 (2), 583–593. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2014.06.010>

18. Ma, C., Wang, Y.-N., Wu, Y.-G., Xu, J.-X. (2017). Hard object impact damage characteristics of aero engine fan blade. *Hangkong Dongli Xuebao/Journal of Aerospace Power*, 32 (5), 1105–1111. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.2017.05.011>
19. Zhang, Z. H., Li, J. W., Mei, K., Wang, J., Wang, N. F. (2020). Foreign Object Impact Detection of Aero-Engine Fan Based on Statistical Characteristics. *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*, 41 (10), 2325–2331. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.190401>
20. Zhang, S., Dong, J. (2024). Numerical simulation and experimental analysis of foreign object impact on aero-engine fan rotor blade. *Journal of Physics: Conference Series*, 2762 (1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2762/1/012038>
21. Yang, X., Lei, X. (2020). Foreign Object Impact Detection and Identification Test of Fan Blade. 2020 11th International Conference on Prognostics and System Health Management (PHM-2020 Jinan), 575–580. <https://doi.org/10.1109/phm-jinan48558.2020.00112>
22. Ogaili, A. A. F., Jaber, A. A., Hamzah, M. N. (2023). A methodological approach for detecting multiple faults in wind turbine blades based on vibration signals and machine learning. *Curved and Layered Structures*, 10 (1). <https://doi.org/10.1515/cls-2022-0214>
23. Mo, Y., Wang, L., Hong, W., Chu, C., Li, P., Xia, H. (2024). Small-Scale Foreign Object Debris Detection Using Deep Learning and Dual Light Modes. *Applied Sciences*, 14 (5), 2162. <https://doi.org/10.3390/app14052162>
24. Zmeskal, O., Dzik, P., Vesely, M. (2013). Entropy of fractal systems. *Computers & Mathematics with Applications*, 66 (2), 135–146. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2013.01.017>
25. Moreno-Gomez, A., Machorro-Lopez, J. M., Amezquita-Sanchez, J. P., Perez-Ramirez, C. A., Valtierra-Rodriguez, M., Dominguez-Gonzalez, A. (2020). Fractal dimension analysis for assessing the health condition of a truss structure using vibration signals. *Fractals*, 28 (07), 2050127. <https://doi.org/10.1142/s0218348x20501273>
26. Pazdriy, O. Ya. (2024). Vdoskonalennia bortovoi systemy keruvania i kontroliu dlia bahatoklasovoi diahnostyky aviatsiynoho hazo-turbinnoho dvyhuna. Kyiv, 236. Available at: <https://ela.kpi.ua/items/23e11037-1a0a-45d4-a79b-97b17efd5f81>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.326676

ВДОСКОНАЛЕННЯ АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ БЛИЖНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОРІЄНТАЦІЄЮ КОСМІЧНОГО АПАРАТУ (с. 6–14)**А. В. Гетьман, О. В. Константінов**

Розглянуто особливості застосування технології забезпечення магнітної чистоти малих космічних апаратів, які мають у системі керування орієнтацією на орбіті циліндричні електромагніти з магнітним моментом $10\text{--}50\text{ А}\cdot\text{м}^2$. Показано, що електромагніти системи керування орієнтацією являються найпотужнішим джерелом магнітної завади з індукцією до 1 Тл для магніточутливого обладнання космічного апарату. Обґрунтована необхідність моделювання магнітного поля електромагніту на попередньому етапі розробки космічного апарату для раціонального вибору його компоновки. З метою вдосконалення технології забезпечення магнітної чистоти, яка спрямована на підвищення надійності експлуатації космічних апаратів, проведено пошук кращої моделі магнітного поля таких електромагнітів.

Проведено порівняльний аналіз наближених аналітичних моделей ближнього магнітного поля циліндричного електромагніту, які базуються на його магнітному моменті та габаритних розмірах. Встановлено, що модель на основі двох зсунутих дипольних моментів та мультипольна модель мають недопустимо великі відхилення результатів розрахунку ближнього магнітного поля поблизу корпусу циліндричного електромагніта. Теоретично обґрунтовані переваги у вигляді розширеної області застосування та зменшеного до 5 % відхилення представлення ближнього магнітного поля при застосуванні моделі на основі циліндричних гармонік електромагніта. Отримані формули для інженерного розрахунку магнітного поля створюваного циліндричним електромагнітом в середині космічного апарату за допомогою його покращеної аналітичної моделі. Запропоновано використовувати модель на основі циліндричних гармонік для попереднього розрахунку магнітної завади, створюваної електромагнітами системи керування орієнтацією магніточутливому обладнанню космічного апарата.

Ключові слова: магнітне поле, аналітична модель, циліндричний електромагніт, магнітна чистота, космічний апарат.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.327021

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СПЕКТРАЛЬНО-КОРЕЛЯЦІЙНОГО ПЕЛЕНГУВАННЯ ТА ОЦІНКИ ЗАТРИМКИ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО НАВЧАННЯ (с. 15–24)**Nurzhigit Smailov, B. B. Ципоренко, Zhomart Ualiyev, Ainur Issova, Zhandos Dosbayev, Yerlan Tashtay, Maigul Zhekambayeva, Temirlan Alimbekov, Rashida Kadyrova, Akezhan Sabibolda**

Об'єктом дослідження є процес оцінки затримки та напрямку радіосигналу за допомогою цифрового спектрально-кореляційного аналізу, посиленого машинним навчанням. Цей процес необхідний для високоточної пеленгації в системах електромагнітного моніторингу. Проблема, що розглядається, полягає в низькій адаптивності та недостатній точності традиційних методів пеленгації за умов змінного сигналу, особливо через ручний вибір параметрів і обчислювальну складність кореляційної обробки.

Суть отриманих результатів полягає в застосуванні методу прогнозування параметрів радіосигналу (затримки та кута) на основі машинного навчання, який зменшив стандартне відхилення оцінок пеленгації до $0,08\text{--}0,026^\circ$ та похибку оцінки затримки до $1,5\text{--}14,8\text{ мкс}$ у діапазоні відношення сигнал/шум від 9 до 37 дБ. Ці результати підтверджуються усередненням понад 1000 реалізацій за допомогою моделювання Монте-Карло, що підтверджує їх стабільність під впливом шуму. Завдяки своїм відмінним особливостям запропоноване рішення вирішило проблему, забезпечивши автоматичний вибір параметрів обробки через навчену нейронну мережу, яка адаптується до нелінійних характеристик сигналу, мінімізуючи потребу в ручному налаштуванні або вищепному пошуку.

Ці результати пояснюються здатністю моделі ідентифікувати приховані залежності між параметрами сигналу та результатами обробки, забезпечуючи адаптивну поведінку та зменшуючи відхилення. Хоча оцінка обчислювальної складності не надається, очікується, що оцінка параметрів на основі прогнозування покращить швидкість обробки в майбутніх реалізаціях. Результати можуть бути застосовані в електромагнітному моніторингу в реальному часі, радіоспостереження та оборонних додатках, особливо в умовах обмежених обчислювальних ресурсів або змінних шумових умов.

Ключові слова: спектрально-кореляційний аналіз, моніторинг радіосигналів, прогнозування параметрів сигналу, точність пеленгації.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.327905

БАГАТОРІВНЕВА ОБРОБКА ВІБРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ ДІАГНОСТИКИ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ (с. 25–33)**Н. І. Бурау, О. Я. Паздрій, О. А. Повщенко**

Об'єктом дослідження є процес моніторингу технічного стану авіаційного газотурбінного двигуна (ГТД). Однією з найнебезпечніших причин аварій є пошкодження, спричинені потраплянням сторонніх об'єктів, зокрема дрібних металевих частинок, градин, болтів, уламків фюзеляжу тощо, у турбіну двигуна під час польоту або на етапах зльоту та посадки.

Проблема полягала у вдосконаленні методів віброакустичної діагностики ГТД, що дозволять підвищити її чутливість до малих змін у діагностичних сигналах, спричинених потраплянням дрібних сторонніх об'єктів у турбіну двигуна. Для вирішення цієї задачі в роботі пропонується використання багаторівневої обробки вібраційних сигналів, отриманих в результаті фізичного моделювання обертової системи (ОС) та імітації потрапляння дрібних сторонніх об'єктів.

Багаторівнева обробка поєднує застосування методів частотно-часового, біспектрального та фрактального аналізу для визначення кількісного інтегрального діагностичного показника – розмірності Мінковського. Отримано такі середні значення розмірності Мінковського для оцінок модуля біспектру: без стороннього впливу – 1,075; попадання дрібних сторонніх об'єктів – 1,01; тертя лопаток о сторонній предмет в наслідок його попадання в турбіну ОС – 1,21.

Встановлено, що збільшення розмірності Мінковського свідчить про розвиток експлуатаційного порушення, спричиненого потраплянням сторонніх об'єктів, навіть дуже малих розмірів.

У роботі представлено експериментальне підтвердження ефективності застосування багаторівневої обробки вібраційних сигналів для діагностування експлуатаційних порушень в наслідок потрапляння сторонніх об'єктів в ОС.

Встановлено, що багаторівнева обробка дозволяє виявляти приховані тренди у зашумленому сигналі, які важко виявити традиційними методами обробки.

Ключові слова: газотурбінний двигун, потрапляння сторонніх об'єктів, обробка сигналів, фрактальний аналіз.