

## ABSTRACT AND REFERENCES

## APPLIED PHYSICS

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209847

**Development of physical models for the formation of acoustic waves at artillery shots and study of the possibility of separate registration of waves of various types (p. 6–15)****Yevhenii Dobrynin**

Institute of Naval Forces of the National University «Odessa Maritime Academy», Odessa, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2777-3137>**Viktor Volkov**

Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3990-8126>**Maksym Maksymov**

Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7536-2570>**Viktor Boltenev**

Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3366-974X>

Physical models of the formation of ballistic and muzzle waves generated during an artillery shot have been developed and investigated. A promising method for assessing the degree of wear of artillery barrels is the acoustic non-contact method. However, its implementation requires separate records of the ballistic and muzzle waves. A series of physical models have been developed to assess the possibility of such a recording. A model for calculating parameters of a ballistic wave accompanying an artillery shot has been built. The proposed model features replacement of the problem of spatial axisymmetric streamlining the shell surface by the problem of plane streamlining the wedge. The model makes it possible to determine the value of the angle of inclination of the oblique shock to the direction of the oncoming flow depending on the Mach number. Calculation of pressure of the powder gases flowing from the muzzle section of the barrel behind the shell is based on the application of the law of energy conservation for compressed powder gases. This avoids solving the complex modified Lagrange problem. Calculations show that the muzzle wave pressure changes in the range (30...300) MPa. A physical model of the muzzle wave propagation at the initial stage of the outflow of powder gases from the bore was proposed. During propagation of the muzzle wave, a situation is possible at an initial stage in which this wave reaches the recording point before the ballistic wave. This situation can occur if the range angles and the wedge taper are small. This phenomenon can be avoided by appropriate angle selection. The proposed model determines the law of propagation of the muzzle wave and makes it possible to estimate the rate of its attenuation. It has been established that measuring microphones recording the actual ballistic wave can be located at distances of 50÷500 m from the barrel. The developed models are useful in practice. It is possible to estimate the initial speed of the shell and the degree of barrel wear by separate recording the ballistic and muzzle waves.

**Keywords:** artillery shot, ballistic wave, muzzle wave, recording of acoustic signals, microphone.

**References**

- Damarla, T. (2015). *Battlefield Acoustics*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16036-8>
- Djeddou, M., Touhami, T. (2013). Classification and Modeling of Acoustic Gunshot Signatures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38 (12), 3399–3406. doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0655-5>
- Maciag, P., Chałko, L. (2019). Use of sound spectral signals analysis to assess the technical condition of mechanical devices. *MATEC Web of Conferences*, 290, 01006. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929001006>
- Dobrynin, Y., Maksymov, M., Boltenev, V. (2020). Development of a method for determining the wear of artillery barrels by acoustic fields of shots. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (5 (105)), 6–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206114>
- Sachdev, P. L. (2016). *Shock Waves & Explosions*. Chapman and Hall/CRC, 296. doi: <https://doi.org/10.1201/9781420035193>
- Van der Eerden, F., Vedy, E. (2005). Propagation of shock waves from source to receiver. *Noise Control Engineering Journal*, 53 (3), 87. doi: <https://doi.org/10.3397/1.2839248>
- Banerjee, A., Nayak, N., Giri, D., Bandha, K. (2019). Effect of Gun Barrel Wear on Muzzle Velocity of a typical Artillery Shell. 2019 International Conference on Range Technology (ICORT). doi: <https://doi.org/10.1109/icort46471.2019.9069641>
- Li, X., Wang, Y., Zang, Y., Guan, B., Qin, Q. (2019). Analysis of interior ballistic performance degradation of a worn gun barrel based on finite element method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1314, 012090. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1314/1/012090>
- Zaytsev, A. S. (2007). *Proektirovanie artillerijskih stvolov*. Sankt-Peterburg: Balt. gos. tehn. un-t, 164.
- Karyukin, S., Mitrohin, O. (2012). Podhod k obespecheniyu zhi-vuchesti stvolov artillerijskih orudiy. *Voennaya mysl'*, 1, 72–78.
- Vershinin, A. A. (2018). The algorithm for evaluating the survivability of the artillery guns systems. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 11, 291–295.
- Pushkaryov, A. M., Vershinin, A. A., Volf, I. G. (2018). Estimation the bore state of an artillery gun. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2, 428–432.
- Skobeleva, V. V., Shchenyatskiy, A. V., Bryzgalov, Y. B. (2017). Analysis of errors of long holes and methods for their control. *Intelligent Systems in Manufacturing*, 15 (3), 41–50. doi: <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2017-3-41-50>
- Peng, F. Q., Chen, Q., Bao, J. W. (2013). Distortion Correction for the Gun Barrel Bore Panoramic Image. *Applied Mechanics and Materials*, 427-429, 680–685. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.427-429.680>
- Ka, M.-H., Vazhenin, N. A., Baskakov, A. I., Oh, C.-G. (2005). Analysis of Power Performance of a Muzzle Velocity Radar. 2005 5th International Conference on Information Communications & Signal Processing. doi: <https://doi.org/10.1109/icics.2005.1689038>
- Levinson, S., Satapathy, S., Elert, M., Furnish, M. D., Anderson, W. W., Proud, W. G., Butler, W. T. (2009). High-resolution projectile velocity and acceleration measurement using photonic doppler velocimetry. *AIP Conference Proceedings*. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3295206>
- Il'yushonok, A. V., Tereshenkov, V. I., Mikanovich, A. S. (2007). Opredelenie parametrov udarnykh voln. *Vestnik Komandno-inzhener-nogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2 (6), 54–62. Available at: <https://vestnik.ucp.by/arhiv/pdf/ICE/v6/n2/54.pdf>
- Shi, L., Ju, F., Liu, Y., Han, Z. Z., Liang, S. Y. (2013). Novel Analysis Method Based on STFT for Muzzle Velocity Measurement of High Firing Rate Artillery. *Applied Mechanics and Materials*, 347-350, 383–386. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.347-350.383>

19. Blokhin, A. M., Biberdorf, E. A. (2015). Numerical resolution of the problem for a stationary real gas flow over a cone. *Vychislitel'nye tehnologii*, 20 (2), 29–43.
20. Houghton, E. L., Carpenter, P. W., Collicott, S. H., Valentine, D. T. (2015). *Aerodynamics for Engineering Students (Seventh Edition)*. Butterworth-Heinemann, 688.
21. Ovsyannikov, L. V. (2003). *Lektsii po osnovam gazovoy dinamiki*. Moscow-Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 336.
22. Semenov, A. N., Berezkina, M. K., Krasovskaya, I. V. (2009). Classification of shock wave reflections from a wedge. Part 2: Experimental and numerical simulations of different types of Mach reflections. *Technical Physics*, 54 (4), 497–503. doi: <https://doi.org/10.1134/s1063784209040094>
23. Seiler, F., Igra, O. (Eds.) (2016). *Hypervelocity Launchers*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26018-1>
24. Bykov, N. V. (2019). Comparative analysis of numerical and approximate analytical solutions to the problem of piston acceleration in a pipe by compressed gas. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2 (86), 1–15. doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1852>
25. Zel'dovich, Ya. B., Rayzer, Yu. P. (2008). *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy*. Moscow: FIZMATLIT, 656.
26. Oppenheim, A. K. (2008). *Dynamics of Combustion Systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77364-1>
27. Assovskiy, I. G.; Lipanov, A. M. (Ed.) (2005). *Fizika goreniya i vnutrennyaya ballistika*. Moscow: Nauka, 354.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210665

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF ACCURACY IN DETERMINING THE DIRECTION TO A PULSED SOURCE OF GAMMA-RADIATION BY A SPHERICAL ABSORBER WITH CdTe DETECTORS IN A SYSTEM OF NUCLEAR SITUATION MONITORING (p. 16–24)**

**Igor Cherniavskiy**

Military Institute of Tank Forces of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2785-0617>

**Mykola Chomik**

National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1201-7702>

**Vadym Tiutiunyk**

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5394-6367>

**Ihor Rolin**

Military Institute of Tank Forces of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2312-6381>

**Viktor Starenkiy**

State Organization «Grigoriev Institute for Medical Radiology and Oncology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kharkiv, Ukraine  
 Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-6600-3381>

**Mykhailo Tverezovskiy**

Odessa Military Academy, Odessa, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7351-932X>

**Oleksandr Sheptur**

Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9808-8041>

**Tymur Kurtseitov**

National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6478-6469>

**Oleksandr Sali**

National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-6876-2170>

**Mykola Pidhorodetskiy**

National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-4807-8635>

The necessity and possibility of creating a dosimetric channel for determining the direction to the source of penetrating gamma-radiation in the nuclear situation monitoring system have been substantiated. The experimental assessment of a reduced error of the device for determining the direction to pulsed sources of radiation using a spherical absorber and CdTe detectors was carried out. These detectors can be used effectively only if there is appropriate electronic equipment, constructed in accordance with their characteristics and spectral-temporal characteristics of highly intense pulsed radiation. The direction to high-intensity pulsed radiation of linear accelerator Varian Clinac 600C (USA) by telluride-cadmium detectors was determined in the pulsed mode. This allowed conducting an experiment to determine the dependence of the coefficient of proportionality of recording pulses from each detector on the angle of direction to the source of pulsed radiation of the linear accelerator. A reduced error was assessed by comparing the received experimental data with a theoretical dependence based on a physical and mathematical model. It was recommended to divide the entire range of angles from 0° to 360° into five sub-ranges, in which three or two proportionality coefficients are responsible for determining the angle in space on gamma sources. The maximum reduced error does not exceed 10 % and the maximum angle error is not more than 8.4°. The most accurate determining of the angle to a radiation source can be carried out in the presence of a theoretically calculated and experimental database of proportionality coefficients for all angles in space and energy of radiation sources.

**Keywords:** direction determination, gamma-radiation, semiconductor detectors, nuclear situation monitoring system.

**References**

1. Mickelson, A. B. (Ed.) (2012). *Medical consequences of radiological and nuclear weapons*. Maryland, 293.
2. Reeves, G. I. (2012). Biophysics and Medical Effects of Enhanced Radiation Weapons. *Health Physics*, 103 (2), 150–158. doi: <https://doi.org/10.1097/hp.0b013e31824abef5>
3. Ho, L. N., Chan, O. S., Gwe, H. Y., Min, L. S. (2011). Pat. No. KR 20110138954. A nuclear detection and control equipment with the functions of a real-time dosimetry. (A), G01T1/16, G21J5/00. No. KR 2010005915420100622; published: 28.12.2011.
4. Bilyk, Z. V., Grigoryev, A. N., Litvinov, Yu. V., Poljanskiy, N. E., Sakun, A. V., Marushchenko, V. V., Chernyavskiy, I. Yu. (2017). Direction measurement on the pulse of gamma source using spherical absorber. *Bulletin of NTU «KhPI»*. Series: *Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika*, 4 (1226), 89–94. Available at: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/34091/1/vestnik\\_KhPI\\_2017\\_4\\_Bilyk\\_Vyznachennia.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/34091/1/vestnik_KhPI_2017_4_Bilyk_Vyznachennia.pdf)
5. Grigoryev, A. N., Bilyk, Z. V., Pettersson, I., Litvinov, Yu. V., Polyanskiy, N. E., Sakun, A. V. et. al. (2018). Physico-mathematical model for determining the direction in space to point sources of gamma radiation using spherical absorber. *Functional Materials*, 25 (2), 391–396. doi: <https://doi.org/10.15407/fm25.02.391>

6. Hryhoriev, O. M., Bilyk, Z. V., Sakun, O. V., Marushchenko, V. V. (2015). Pat. No. 108262 UA. Sposib vyznachennia napriamku na impulsni dzhherela hamma-vyprominiuvannia. No. a201305335; declared: 25.04.2013; published: 10.04.2015, Bul. No. 7. Available at: <http://uapatents.com/4-108262-sposib-vyznachennya-napryamku-na-impulsni-dzherela-gamma-viprominyuvannya.html?do=download>
7. Bilyk, Z. V., Hryhoriev, O. M., Sakun, O. V., Marushchenko, V. V. (2012). Vyznachennia napriamku v prostori na tochkovi dzhherela pronykaiuchoho vyprominiuvannia, u tomu chysli impulsni. Tezysy dopovidi XX mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsiyi: Informatsiyni tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorovia. Kharkiv: NTU «KhPI», 137.
8. Fizika yadernogo vzryva. Vol. 1. Razvitie vzryva (1997). Moscow: Nauka. Fizmatlit, 528. Available at: [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_61809#1](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_61809#1)
9. Nakamura, S., Mukai, T., Manabe, M., Murata, I. (2012). Characterization Test of CdTe Detector Element Designed and Developed for BNCT-SPECT. Proc. of the 2011 Annual Symposium on Nucl, 165–170.
10. Islamian, J., Abbaspour, S., Mahmoudian, B. (2017). Cadmium telluride semiconductor detector for improved spatial and energy resolution radioisotopic imaging. World Journal of Nuclear Medicine, 16 (2), 101. doi: <https://doi.org/10.4103/1450-1147.203079>
11. Rybka, A. V., Davydov, L. N., Shlyakhov, I. N., Kutny, V. E., Prokhoretz, I. M., Kutny, D. V., Orobinsky, A. N. (2004). Gamma-radiation dosimetry with semiconductor CdTe and CdZnTe detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 531 (1-2), 147–156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.05.107>
12. El'yash, S. L., Rodigin, A. V., Loiko, T. V., Polyakov, A. I., Kapitanov, S. V. (2011). CdTe-based detectors for recording X-ray pulses with a subnanosecond resolution. Instruments and Experimental Techniques, 54 (4), 555–557. doi: <https://doi.org/10.1134/s0020441211040117>
13. Scheiber, C. (2000). CdTe and CdZnTe detectors in nuclear medicine. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 448 (3), 513–524. doi: [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(00\)00282-5](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(00)00282-5)
14. Scheiber, C., Giakos, G. C. (2001). Medical applications of CdTe and CdZnTe detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 458 (1-2), 12–25. doi: [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(00\)01032-9](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(00)01032-9)
15. Nagarkar, V., Squillante, M., Entine, G., Stern, I., Sharif, D. (1992). CdTe detectors in nuclear radiation dosimetry. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 322 (3), 623–627. doi: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(92\)91242-2](https://doi.org/10.1016/0168-9002(92)91242-2)
16. Jeraj, R., Mackie, T. R., Balog, J., Olivera, G., Pearson, D., Kapatoes, J. et. al. (2004). Radiation characteristics of helical tomotherapy. Medical Physics, 31 (2), 396–404. doi: <https://doi.org/10.1118/1.1639148>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209927

#### EXCHANGE INTERACTION AND MODELS OF CONTACT GENERATION OF DISTURBANCES IN TRIBOSYSTEMS (p. 25–34)

**Yuriy Zasp**

Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3274-172X>

**Aleksandr Dykha**

Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3020-9625>

**Dmytro Marchenko**

Mykolaiv National Agrarian University, Mykolayiv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0808-2923>

**Serhii Matiukh**

Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9899-109X>

**Yuri Kukurudzyak**

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsya, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0347-6533>

The physical mechanisms have been investigated that form and transform the corpuscular-vortex-wave thermal complexes of disturbances in contact tribosystems based on the quantum-mechanical exchange interaction. The presence of a contact gap determines the generation of pairs of quasi-particles-disturbances stabilized by wavelength and frequency. Internal instability and collapse processes in such a system of disturbances lead to the formation of defects in a tribo-pair's material and underlie the emergency friction regimes. This paper gives specific technical examples of the generation of thermal complexes at fretting, during the friction of sliding and rolling, and at cutting. It has been established that the destructive nature of the process of fretting at low values of reverse sliding speeds is caused by the generation and collapse of the corpuscular-vortex-wave thermal complexes. An example of acoustic friction emission in the ultrasonic region of the spectrum has been used to show the quantum nature of the disturbances generated by friction. The high-frequency spectrum of acoustic emission corresponds to the unbalanced composition of the disturbances and leads to the formation of wear particles. The exchange interaction in a tribosystem involving rolling on the plane has been considered. The results of statistical analysis of such rolling showed the existence of the effect of negative friction caused by the quantum generation of longwave disturbances. It has been demonstrated that the collapsed component of the generation of disturbances is significantly increased under the modes of materials destruction, including when cutting the materials. The corpuscular-vortex-wave mechanism of selective transfer and hydrogen wear in tribosystems has been described. It is shown that the properties of a servovite film under the mode of selective transfer are provided by the collapse processes in the system of disturbances. Similar processes at the vortex-wave transfer of hydrogen atoms in metals lead to the wear and destruction of the surface layer of friction.

**Keywords:** contact tribodynamics, corpuscular-vortex-wave thermal complex, exchange interaction, collapse, acoustic emission.

#### References

1. Silveirinha, M. G. (2014). Theory of quantum friction. New Journal of Physics, 16 (6), 063011. doi: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/6/063011>
2. Esirkepov, T. Z., Bulanov, S. V. (2017). Paradoxical stabilization of forced oscillations by strong nonlinear friction. Physics Letters A, 381 (32), 2559–2564. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.06.007>
3. Suzuki, K., Hirai, Y., Ohzono, T. (2014). Oscillating Friction on Shape-Tunable Wrinkles. ACS Applied Materials & Interfaces, 6 (13), 10121–10131. doi: <https://doi.org/10.1021/am5010738>
4. Dykha, A. V., Zasp, Y. P., Slashchuk, V. O. (2018). Triboacoustic Control of Fretting. Journal of Friction and Wear, 39 (2), 169–172. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366618020046>
5. Dykha, A., Matyukh, S. (2018). Triboacoustic diagnostic fixed joints of machines. MATEC Web of Conferences, 182, 02017. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818202017>
6. Aulin, V., Hryniv, A., Lysenko, S., Rohovskii, I., Chernovol, M., Lyashuk, O., Zamota, T. (2019). Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (6 (97)), 6–12. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156150>

7. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Zamota, T., Pankov, A., Tykhyi, A. (2019). Determining the rational composition of tribologically active additive to oil to improve characteristics of tribosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (12 (102)), 52–64. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184496>
8. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Lyashuk, O., Zamota, T., Holub, D. (2019). Studying the tribological properties of mated materials C61900 - A48-25BC1.25BNo. 25 in composite oils containing geomodifiers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (12 (101)), 38–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179900>
9. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Dykha, A., Zamota, T., Dzyura, V. (2019). Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (12 (99)), 6–16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.171619>
10. Li, Q., Popov, V. L. (2018). On the Possibility of Frictional Damping with Reduced Wear: A Note on the Applicability of Archard's Law of Adhesive Wear under Conditions of Fretting. *Physical Mesomechanics*, 21 (1), 94–98. doi: <https://doi.org/10.1134/s1029959918010137>
11. Wetter, R., Popov, V. L. (2016). The Influence of System Dynamics on the Frictional Resistance: Insights from a Discrete Model. *Tribology Letters*, 61(2). doi: <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0635-x>
12. Aleksandr, D., Dmitry, M. (2018). Prediction the wear of sliding bearings. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (2.23), 4–8. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11872>
13. Dykha, A., Sorokatyi, R., Makovkin, O., Babak, O. (2017). Calculation-experimental modeling of wear of cylindrical sliding bearings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (89)), 51–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109638>
14. Marchuk, V. Y., Kindrachuk, M. V., Mirnenko, V. I., Mnat-sakanov, R. G., Kornienko, A. O., Bashta, O. V., Fedorchuk, S. V. (2019). Physical Interpretations of Internal Magnetic Field Influence on Processes in Tribocontact of Textured Dimple Surfaces. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 11 (5), 05013-1–05013-5. doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(5\).05013](https://doi.org/10.21272/jnep.11(5).05013)
15. Marchuk, V., Kindrachuk, M., Kryzhanovskiy, A. (2014). System analysis of the properties of discrete and oriented structure surfaces. *Aviation*, 18 (4), 161–165. doi: <https://doi.org/10.3846/16487788.2014.985474>
16. Kindrachuk, M. V., Vol'chenko, A. I., Vol'chenko, D. A., Skrypyuk, V. S., Voznyi, A. V. (2019). Energy Levels of Different Types of Contacts of Microirregularities of Friction Couples. *Materials Science*, 54 (6), 843–854. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00272-5>
17. Sorokatyi, R., Chernets, M., Dykha, A., Mikosyanchyk, O. (2019). Phenomenological Model of Accumulation of Fatigue Tribological Damage in the Surface Layer of Materials. *Mechanisms and Machine Science*, 3761–3769. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9\\_371](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_371)
18. Dykha, A., Sorokatyi, R., Dytyniuk, V. (2019). Model of accumulation of tribo damage in high-speed friction. *BALTTRIB' 2019: proceedings of X international scientific conference*, Vytautas Magnus University, Agriculture Academy. Kaunas, 180–186. Available at: [https://www.vdu.lt/cris/bitstream/20.500.12259/103203/1/ISSN2424-5089\\_2019.PG\\_180-186.pdf](https://www.vdu.lt/cris/bitstream/20.500.12259/103203/1/ISSN2424-5089_2019.PG_180-186.pdf)
19. Dykha, A., Makovkin, O. (2019). Physical basis of contact mechanics of surfaces. *Journal of Physics: Conference Series*, 1172, 012003. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1172/1/012003>
20. Dykha, A., Aulin, V., Makovkin, O., Posonskiy, S. (2017). Determining the characteristics of viscous friction in the sliding supports using the method of pendulum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (87)), 4–10. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99823>
21. Danilov, S. D., Gurarie, D. (2000). Quasi-two-dimensional turbulence. *Physics-Uspeski*, 43 (9), 863–900. doi: <https://doi.org/10.1070/pu2000v043n09abeh000782>
22. Zaspá, Y. P. (2012). Coherent tribodynamics. *Journal of Friction and Wear*, 33 (6), 490–503. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366612060128>
23. Myshkin, N. K., Markova, L. V. (2017). Trends in On-line Tribodiagnostics. *On-Line Condition Monitoring in Industrial Lubrication and Tribology*, 203–223. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-61134-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61134-1_6)
24. Briscoe, B. J., Chateauminos, A., Chiu, J., Vickery, S. (2001). Acoustic noise emission in a model PMMA/steel fretting contact. *Tribology Research: From Model Experiment to Industrial Problem - A Century of Efforts in Mechanics, Materials Science and Physico-Chemistry*, Proceedings of the 27th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 673–681. doi: [https://doi.org/10.1016/s0167-8922\(01\)80149-8](https://doi.org/10.1016/s0167-8922(01)80149-8)
25. Akay, A. (2002). Acoustics of friction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111 (4), 1525–1548. doi: <https://doi.org/10.1121/1.1456514>
26. Kolubaev, A. V., Kolubaev, E. A., Vagin, I. N., Sizova, O. V. (2005). Sound Generation in Sliding Friction. *Technical Physics Letters*, 31 (10), 813–816. doi: <https://doi.org/10.1134/1.2121824>
27. Rubtsov, V. E., Kolubaev, E. A., Kolubaev, A. V., Popov, V. L. (2013). Using acoustic emission for the analysis of wear processes during sliding friction. *Technical Physics Letters*, 39 (2), 223–225. doi: <https://doi.org/10.1134/s1063785013020235>
28. Markova, L. V., Myshkin, N. K., Kong, H., Han, H. G. (2011). On-line acoustic viscometry in oil condition monitoring. *Tribology International*, 44 (9), 963–970. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.03.018>
29. Zinin, M. A., Gavrilov, S. A., Shchedrin, A. V., Garkunov, D. N. (2011). Influence of metal-cladding additive valena on combined machining. *Russian Engineering Research*, 31 (9), 880–884. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068798x11090292>
30. Shchedrin, A. V., Bekaev, A. A., Garkunov, D. N., Mel'nikov, E. A., Gavriluk, V. S. (2011). Improvement in hybrid drawing by a tool with regular microgeometry on the basis of metal-coating additives. *Russian Engineering Research*, 31 (4), 365–368. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068798x1104023x>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210232

**AN EXPERIMENTAL ANALYSIS OF DC MAGNETIC BLOWOUT HIGH-SPEED CIRCUIT BREAKERS' PARAMETERS (p. 35–40)**

**Artur Rojek**

Railway Research Institute, Warsaw, Poland  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4225-3482>

High-speed circuit breakers (HSCB) used in DC circuits are one of the basic elements of overload, short-circuit and electric shock protection. Such breakers are used in transport (trams, trolleybuses, subways and railways) in electric power supply facilities and in vehicles. The performance and capability of limiting the current depend on the HSCB design and solutions applied in it. The circuit parameters, particularly its inductance also affect the performance. Additionally, each DC breaking in the RL circuit is accompanied by overvoltages whose level depends on the circuit parameters and breaker design. The paper discussed the process of direct current breaking by magnetic blowout high-speed circuit breakers and factors that affect the HSCB performance, i. e. opening time and arcing time. The influence of the circuit parameters and HSCB design on the value of arc voltage is outlined. The results of laboratory tests of 4 types of high-speed circuit breakers produced in Europe are presented. The test results were used to analyze the effect of current changes in the short circuit on the time of current breaking and the value of switching overvoltages – arc voltage. The results of simulation of the short-circuit breaking in the RL DC circuit made at the rate-of-rise of current in the

circuit are presented. Based on the tests and simulations, the current breaking times, values of arc voltage generated in this process and arc energy that is acquired and dissipated by the arc chamber are determined. The objective of the tests and simulations was to answer the question whether it is possible to turn off direct current quickly without generating high arc voltage values – over-voltages in the circuit and how di/dt changes should be formed by a high-speed circuit breaker to achieve the shortest possible time with the lowest possible arc voltage and its lowest energy.

**Keywords:** high-speed circuit breaker, breaking time, arcing time, arc voltage.

## References

- Ahmad, M., Wang, Z. (2019). A Hybrid DC Circuit Breaker with Fault-Current-Limiting Capability for VSC-HVDC Transmission System. *Energies*, 12 (12), 2388. doi: <https://doi.org/10.3390/en12122388>
- Alferov, D., Budovsky, A., Evsin, D., Ivanov, V., Sidorov, V., Yagnov, V. (2008). DC vacuum circuit-breaker. 2008 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. doi: <https://doi.org/10.1109/deiv.2008.4676747>
- Bingjian, Y., Yang, G., Xiaoguang, W., Zhiyuan, H., Longlong, C., Yunhai, S. (2015). A hybrid circuit breaker for DC-application. 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM). doi: <https://doi.org/10.1109/icdcm.2015.7152036>
- Borkowski, P., Nowak, Ł., Szymański, S. (2018). The new design of the vacuum circuit breaker mounted on the roof of Electric Traction Units. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1 (8), 136–139. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2018.08.32>
- Kowalak, R. (2007). Influence of short-circuits switched-off by current-limiting circuit breakers on MV network supplying the traction substations. *Electrical Review*, 83 (3), 19–22.
- Ma, R., Rong, M., Yang, F., Wu, Y., Sun, H., Yuan, D. et al. (2013). Investigation on Arc Behavior During Arc Motion in Air DC Circuit Breaker. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41 (9), 2551–2560. doi: <https://doi.org/10.1109/tps.2013.2273832>
- Maciołek, T., Mierzejewski, L., Szeląg, A. (2001). Breaking the short-circuits in DC traction by high-speed circuits breakers and power-switch. *Technika Transportu Szynowego*, 3, 40–47.
- Mierzejewski, L., Szeląg, A. (1999). Research of short circuits and overvoltages in DC electric traction circuits with single-stage transformations 110/3 kV. *IVth International Conference MET'99*, 58–64.
- Pei, X., Smith, A. C., Cwikowski, O., Barnes, M. (2020). Hybrid DC circuit breaker with coupled inductor for automatic current commutation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 120, 106004. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106004>
- Rojek, A., Zbieć, A. (2012). Co-ordination of Short Circuit Protection Devices in Motive Power Unit - Sub-station System. *Problemy Kolejnictwa*, 154, 27–46.
- Rojek, A. (2015). Switching-off time of electromagnetic blow-out high-speed DC circuit breaker. *Problemy Kolejnictwa*, 169, 53–60.
- Rojek, A. (2018). Parameters of DC high-speed circuit-breakers. *MATEC Web of Conferences*, 180, 06006. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818006006>
- Rojek, A. (2020). Investigation of the impact of the contact arc time on the breaking time of high-speed circuit breakers. *Prace Instytutu Kolejnictwa*, 164, 28–41.
- Rojek, A., Skrzyniarz, M. (2019). Contact arc time – important parameter of DC high-speed circuit-breakers. *MATEC Web of Conferences*, 294, 05002. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929405002>
- Sécheron, S. A. (2019). High-speed DC circuit breakers for fixed installations (EN/IEC) Type UR. Available at: [https://www.secheron.com/wp-content/uploads/docs/SG101001BEN\\_F15\\_Brochure\\_Circuit-breaker-DC\\_UR26-80S\\_09.19.pdf](https://www.secheron.com/wp-content/uploads/docs/SG101001BEN_F15_Brochure_Circuit-breaker-DC_UR26-80S_09.19.pdf)
- Szeląg, A., Tuliński, K. (2003). Analysis of technical effectiveness of application of a thyristor short-circuiting device in parallel with inductance in rectifier traction substations – simulations and measurements. *Vth International Conference „Modern Electric Traction in Integrated XXI Century Europe” MET 2003*.
- Wójcik, F. (2011). Influence of short-circuit parameters and construction of commutation circuit of ultra-high-speed vacuum circuit breakers on dynamics of its operation. *Electrical Review*, 87 (11), 201–208.
- Xingguang, H., Hua, L., Zhiqian, S., Zhigang, R., Shusheng, W., Cunwen, T., Peng, F. (2020). Concept design of 100 kA hybrid DC breaker on China fusion engineering test reactor. *Fusion Engineering and Design*, 158, 111740. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111740>
- Żukowski, P., Kozak, C. (2010). Testing dc arc energy depending on the polarity of contacts connection. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 48 (7), 137–140.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210769

**INFLUENCE OF A SIGNAL DESCRIPTION MODEL ON THE CALCULATIONS OF THE EFFICIENCY INDICATORS OF OPToelectRONIC SYSTEMS (p. 41–50)**

**Tatiana Strelkova**

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3608-4897>

**Aleksandr Lytuysa**

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9799-8270>

**Aleksandr Kalmykov**

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3000-0469>

**Ganna Khoroshun**

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University,

Severodonetsk, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1272-1222>

**Andrii Riazantsev**

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University,

Severodonetsk, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1431-5682>

**Oleksandr Ryazantsev**

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University,

Severodonetsk, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3740-3132>

The work is aimed at establishing the boundaries of the use of models for describing signals in optoelectronic systems in calculating efficiency.

A description of the signal formation process is proposed, taking into account the corpuscular and wave properties when registering signals in a wide range of intensities.

A description of the statistical features of the output signals depending on the energy properties of the signal and noise components is proposed. It is shown that when describing the output signals of optoelectronic systems that register signals with different properties, Poisson and Gaussian distributions are used. The invariance of Poisson flows determines the description of an additive mixture of signal and background flows using Poisson flow.

The efficiency of optoelectronic systems is calculated by the signal-to-noise ratio criterion based on the corpuscular and wave description of signals. Efficiency calculations have shown the expedience of using this criterion, provided that the statistical properties

of signal and background flows are stabilized. It is shown that under the condition of changes in the energy characteristics of signals, from the point of view of the wave and corpuscular models, the statistical characteristics of the signals have different descriptions.

The analysis of theoretical methods of signal analysis in optoelectronic systems is carried out, which is aimed at an adequate characteristic of the system operation, depending on the conditions of its operation. Taking into account the method of describing the process of receiving and processing signals will take into account additional statistical characteristics of signals, for example, an increase of the variance of the output signal. The use of adaptive methods for describing signals will make it possible to increase the efficiency of systems when receiving strong signals in a difficult interference environment, as well as when receiving weak signals.

**Keywords:** optoelectronic system, corpuscular theory, wave theory of light, statistical model, detection.

### References

- Fedoseev, V. I., Kolosov, M. P. (2007). Optiko-elektronnye pribory orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov. Moscow: Logos, 248.
- Parfenov, V. I., Kirillov, V. S. (2012). Optical signal detection according to the photoelectron flow with unknown density waveform. *Komp'yuternaya optika*, 36 (4), 618–622.
- Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., Gonzalez-Navarro, F., Rivera-Castillo, J., Hernandez-Balbuena, D. (2013). Digital Signal Processing on Optoelectronic for SHM. In Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. Vol. I. San Francisco.
- Strelkov, A. I., Moskvitin, S. V., Lytyuga, A. P., Strelkova, T. A. (2010). Opticheskaya lokatsiya. Teoreticheskie osnovy priema i obrabotki opticheskikh signalov. Kharkiv: Apostrof, 312.
- Dutton, N. A. W., Gyongy, I., Parmesan, L., Gnecci, S., Calder, N., Rae, B. R. et. al. (2016). A SPAD-Based QVGA Image Sensor for Single-Photon Counting and Quanta Imaging. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 63 (1), 189–196. doi: <https://doi.org/10.1109/ted.2015.2464682>
- Fossum, E. R. (2013). Modeling the Performance of Single-Bit and Multi-Bit Quanta Image Sensors. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 1 (9), 166–174. doi: <https://doi.org/10.1109/jeds.2013.2284054>
- Ma, J., Masoodian, S., Starkey, D. A., Fossum, E. R. (2017). Photon-number-resolving megapixel image sensor at room temperature without avalanche gain. *Optica*, 4 (12), 1474. doi: <https://doi.org/10.1364/optica.4.001474>
- Al-Ani, M. S., Ali Alheeti, K. M. (2017). Precision Statistical Analysis of Images Based on Brightness Distribution. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 2 (4), 99–104. doi: <https://doi.org/10.25046/aj020413>
- Dutton, N., Gyongy, I., Parmesan, L., Henderson, R. (2016). Single Photon Counting Performance and Noise Analysis of CMOS SPAD-Based Image Sensors. *Sensors*, 16 (7), 1122. doi: <https://doi.org/10.3390/s16071122>
- Nikitin, V. M., Fomin, V. N., Nikolaev, A. I., Borisenkov, I. L. (2008). Adaptivnaya pomozhazhchita optiko-elektronnykh informatsionnykh sistem. Belgorod: Izd-vo BelGU, 196.
- Tihonov, V. I. (1983). Optimal'nyi priem signalov. Moscow: «Radio i svyaz'», 320.
- Matveev, A. N. (1988). Optics. Moscow: Mir, 446.
- Strilkova, T. (2017). Rozvytok stokhastyko-determinovanoi teoriiy pry-iomu ta obrobky syhnaliv v optiko-elektronnykh systemakh. Kyiv, 343.
- Strelkova, T., Kartashov, V., Lytyuga, A. P., Strelkov, A. I. (2017). Theoretical Methods of Images Processing in Optoelectronic Systems. *Advances in Computational Intelligence and Robotics*, 180–205. doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0632-4.ch006>
- Fedoseev, V. I. (2011). Priem prostranstvenno-vremennykh signalov v optiko-elektronnykh sistemakh (puassonovskaya model'). Moscow: Logos, 232.
- Cunningham, I. A., Shaw, R. (1999). Signal-to-noise optimization of medical imaging systems. *Journal of the Optical Society of America A*, 16 (3), 621. doi: <https://doi.org/10.1364/josaa.16.000621>
- Feng Yang, Lu, Y. M., Sbaiz, L., Vetterli, M. (2012). Bits From Photons: Oversampled Image Acquisition Using Binary Poisson Statistics. *IEEE Transactions on Image Processing*, 21 (4), 1421–1436. doi: <https://doi.org/10.1109/tip.2011.2179306>
- Bédard, G. (1967). Analysis of Light Fluctuations from Photon Counting Statistics\*. *Journal of the Optical Society of America*, 57 (10), 1201. doi: <https://doi.org/10.1364/josa.57.001201>
- Strelkova, T. (2015). Using stable distribution laws during evaluation of signal processing efficiency in optoelectronic systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (74)), 4–10. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39950>
- Kuriksha, A. A. (1973). Kvantovaya optika i opticheskaya lokatsiya (statisticheskaya teoriya). Moscow: Sovetskoe radio, 183.
- Sheremet'ev, A. G. (1971). Statisticheskaya teoriya lazernoy svyazi. Moscow: «Svyaz'», 264.
- Venttsel', E. S., Ovcharov, L. A. (2000). Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya. Moscow: Vysshaya shkola, 383.
- Feller, V. (1967). Vvedenie v teoriyu veroyatnosti i ee prilozheniya. Vol. 2. Moscow: Mir, 765.
- Khoroshun, A. N., Vasnetsov, M. V., Pas'ko, V. A., Soskin, M. S. (2007). Structure of the axial intensity minima in the Fresnel diffraction on a circular opening and superluminescent effects. *Optics Communications*, 271 (2), 316–322. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2006.10.030>
- Khoroshun, A., Ryazantsev, A., Ryazantsev, O., Sato, S., Kozawa, Y., Masajada, J. et. al. (2020). Formation of an optical field with regular singular-skeleton structure by the double-phase-ramp converter. *Journal of Optics*, 22 (2), 025603. doi: <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ab61e9>
- Horstmann, J., Spahr, H., Buj, C., Mnter, M., Brinkmann, R. (2015). Full-field speckle interferometry for non-contact photoacoustic tomography. *Physics in Medicine and Biology*, 60 (10), 4045–4058. doi: <https://doi.org/10.1088/0031-9155/60/10/4045>
- Kumar, M., Khan, G. S., Shakher, C. (2015). Measurement of elastic and thermal properties of composite materials using digital speckle pattern interferometry. *SPECKLE 2015: VI International Conference on Speckle Metrology*. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2196390>
- Kulya, M., Petrov, N. V., Tsyppkin, A., Egiazarian, K., Katkovnik, V. (2019). Hyperspectral data denoising for terahertz pulse time-domain holography. *Optics Express*, 27 (13), 18456. doi: <https://doi.org/10.1364/oe.27.018456>
- Bol'shakov, I. A., Rakoshits, V. S. (1978). Prikladnaya teoriya sluchaynykh potokov. Moscow: Sov. radio, 248.
- Koks, D., Lyuis, P. (1969). Statisticheskii analiz posledovatel'nostey sobytiiy. Moscow: Mir, 312.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210776

### DEVELOPMENT OF SWITCHING AND MEASUREMENT CIRCUITS FOR PROBLEMS OF ELECTRIC IMPEDANCE TOMOGRAPHY (p. 51–59)

Artem Kucher

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
“Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)”,  
Novocherkassk, Russian Federation

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9112-0424>

Nuri Narakidze

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
“Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)”,  
Novocherkassk, Russian Federation

**Polina Tjaglicova**

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
“Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)”,  
Novocherkassk, Russian Federation  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-4973-1245>

**Maryana Filonova**

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
“Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)”,  
Novocherkassk, Russian Federation  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5727-1309>

This study solves the relevant problem of selecting an optimal switching and measurement circuit for the problems of reconstruction of the field of change in the conductivity in a biological object.

Based on an analysis of publications in the area of construction of the hardware part of the EIT devices, the main types of the systems were identified: sequential, parallel, and mixed. Because of the low cost, sequential architecture became most common.

Due to the low level of a useful signal in the study of lung ventilation, the differential measurement circuit, which enables amplification of a difference signal, is considered optimal. A difference signal changes significantly as it moves away from injecting electrodes, so the optimal use of the analog-to-digital converter scale requires a change in the amplification coefficient during the collection of measurement information. A measurement circuit with an adaptive amplification coefficient was proposed. The optimal amplification coefficient is determined by the results of test measurements. A block diagram for the implementation of the proposed algorithm was developed.

A circuit for switching the injecting and measuring electrodes, allowing the injection and measurement between any pair of electrodes, was proposed. Theoretical analysis of the impact of switch parameters was carried out. The analysis revealed that the main parameters influencing the metrological characteristics are the resistance of the open channel and its spread.

As a result of mathematical modeling of the circuit of substitution of injection and measurement channels, it was determined that channel resistance and its spread for typical switches results in a relative error in measurements of potentials of no more than 0.2 %

**Keywords:** electric impedance tomography, image reconstruction, medical visualization, conductivity distribution, measurement, switcher.

**References**

- Pekker, Ya. S., Brazovskiy, K. S., Usov, V. N. (2004). Elektroimpedantnaya tomografiya. Tomsk: NTL, 192.
- Brazovskiy, K. S. (2015). Metody i tekhnicheskie sredstva otsenki funktsional'nogo sostoyaniya golovnogo mozga cheloveka na osnove elektricheskikh izmereniy. Tomsk. Available at: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/30581/1/dis00061.pdf>
- Mat-Shayuti, M. S., Zulkifli, H., Yahya, E., Othman, N. H., Hassan, Z. (2019). Development of Low-Cost, Non-Obtrusive Electrical Impedance Tomography Device for Liquid-Gas Flow Visualization. International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, 119–126. doi: <https://doi.org/10.18178/ijeetc.8.2.119-126>
- Meroni, D., Maglioli, C. C., Bovio, D., Greco, F. G., Aliverti, A. (2017). An electrical impedance tomography (EIT) multi-electrode needle-probe device for local assessment of heterogeneous tissue impedivity. 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). doi: <https://doi.org/10.1109/embc.2017.8037091>
- Gsoßmann, S., Zhao, Y., Schagerl, M. (2016). Development of data acquisition devices for electrical impedance tomography of composite materials. 17th European Conference on Composite Materials, ECCM 2016. Munich, 126913.
- S Arshad, S. H., Kunzika, J. S., Murphy, E. K., Odame, K., Halter, R. J. (2015). Towards a smart phone-based cardiac monitoring device using electrical impedance tomography. 2015 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS). doi: <https://doi.org/10.1109/biocas.2015.7348452>
- Yao, A., Soleimani, M. (2012). A pressure mapping imaging device based on electrical impedance tomography of conductive fabrics. Sensor Review, 32 (4), 310–317. doi: <https://doi.org/10.1108/02602281211257542>
- Deng, Q., Su, Y., Hu, S., Xiong, X., Juan, R., Zhang, Y., Ma, H. (2018). A Parallel Impedance Measurement System for Electrical Impedance Tomography System with Multi - Microcontroller - Unit Architecture. 2018 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO). doi: <https://doi.org/10.1109/3m-nano.2018.8552230>
- Menden, T., Orschulik, J., Tholen, T., Leonhardt, S., Walter, M. (2017). Approach to compensate measurement errors in electrical impedance tomography. 2017 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS). doi: <https://doi.org/10.1109/biocas.2017.8325139>
- Gargiulo, G. D., Oh, T. I., Nguyen, D. T., Tapson, J., McEwan, A. L., Cohen, G. et. al. (2012). Active electrode design suitable for simultaneous EIT and EEG. Electronics Letters, 48 (25), 1583–1584. doi: <https://doi.org/10.1049/el.2012.3212>
- Electrical impedance tomography. Available at: <http://www.eit.org.uk/about.html>
- Kamenský, M., Kováč, K. (2011). Correction of ADC Errors by Additive Iterative Method with Dithering. Measurement Science Review, 11 (1). doi: <https://doi.org/10.2478/v10048-011-0004-3>
- Troyanovskiy, V. M., Koldaev, V. D., Zapevalina, A. A., Serduk, O. A., Vasilchuk, K. S. (2017). Why the using of Nyquist-Shannon-Kotelnikov sampling theorem in real-time systems is not correct? 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon Rus). doi: <https://doi.org/10.1109/eiconrus.2017.7910736>
- Troyanovskiy, V. M., Koldaev, V. D., Zapevalina, A. A., Serduk, O. A., Vasilchuk, K. S. (2017). Why the using of Nyquist-Shannon-Kotelnikov sampling theorem in real-time systems is not correct? 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon Rus). doi: <https://doi.org/10.1109/eiconrus.2017.7910736>
- Ross, A. S., Saulnier, G. J., Newell, J. C., Isaacson, D. (2003). Current source design for electrical impedance tomography. Physiological Measurement, 24 (2), 509–516. doi: <https://doi.org/10.1088/0967-3334/24/2/361>
- Micro CAP 12. Available at: <http://www.spectrum-soft.com/index.shtm>
- 10 MHz, 20 V/μs, G = 1, 10, 100, 1000 iCMOS. Programmable Gain Instrumentation Amplifier. AD8253. Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8253.pdf>

**DOI:** 10.15587/1729-4061.2020.210774

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A VIRTUAL TEST BENCH FOR ELECTRIC IMPEDANCE TOMOGRAPHY CHANNEL MAIN COMPONENTS SIMULATION (p. 60–69)**

**Ivan Shcherbakov**

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
“Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)”,  
Novocherkassk, Russia  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-4141-9444>

**Nikolay Gorbatenko**

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
“Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)”,  
Novocherkassk, Russia  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1049-4801>

**Roman Polyakov**

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
 “Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)”,  
 Novocherkassk, Russia  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3182-1165>

**Konstantin Shirokov**

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
 “Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)”,  
 Novocherkassk, Russia

When developing and determining the principles of construction and algorithms for the operation of electrical impedance tomography devices, it is necessary to verify the adequacy of the adopted circuitry solutions, their technical level and the possibility of practical implementation. To assess the technical capabilities and operating parameters of the device and its components, it is advisable to develop specialized tools for research and adjustment. Considering that the devices for electrical impedance tomography being developed are hardware and software solutions, and their components are complete electronic units that interact with each other, it seems possible to develop an experimental bench.

The development of a virtual automated experimental bench for preliminary tests of the main components of the electrical impedance tomography channel is proposed. On the basis of the operating principles of the hardware bench, the principles of building a virtual bench are formulated. The correspondence of the main elements of hardware and virtual benches in terms of their functional purpose is shown.

For each of the software components of the virtual bench, input actions and output parameters are determined.

A schematic diagram of the analog part of the electrical impedance tomography channel has been developed to test the performance of the virtual bench. Studies have shown that the developed virtual bench is suitable for preliminary testing of all analog components of the channel.

The use of the developed virtual bench will allow optimizing the time and material costs for conducting experimental research in the process of developing hardware for technical means of electrical impedance tomography.

**Keywords:** electrical impedance tomography, test bench, virtual bench, automated tests, experimental research.

**References**

- Novitskiy, P. V., Zograf, I. A. (1991). Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy. Leningrad: Energoatomizdat, 304.
- Gritskevich, E. V., Zvyagintseva, P. A., Urbanskiy, O. V. (2010). Virtual'niy ispytatel'niy stend dlya issledovaniya optiko-elektronnyh sistem. GEO-SIBIR'-2010: sb. materialov VI Mezhdunar. nauch. kongr., 5 (1), 53–56.
- Eresko, S. P., Eresko, T. T., Kukushkin, E. V., Orlov, A. A. (2016). Creating a virtual oscilloscope for test bench. Reshetnevskie chteniya, 1, 407–409.
- Da Silva, L. A., Dekneuvél, E., Lewicki, A., Nicolle, B., Jacquemod, G. (2012). Virtual RF system platform dedicated to heterogeneous complex SoC design. Microelectronics Journal, 43 (2), 98–109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2011.11.007>
- Gnecchi, J. A. G. (2010). Dynamic Link Library and Signal Conditioning System for Electrical Impedance Tomography Virtual Instrumentation. 2010 IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. doi: <https://doi.org/10.1109/cerma.2010.128>
- Gaggero, P. O., Adler, A., Waldmann, A. D., Mamatjan, Y., Justiz, J., Koch, V. M. (2015). Automated robust test framework for electrical impedance tomography. Physiological Measurement, 36 (6), 1227–1244. doi: <https://doi.org/10.1088/0967-3334/36/6/1227>
- Caminiti, I. M. V., Ferraioli, F., Formisano, A., Martone, R. (2010). Optimized testing procedure for electrical impedance tomography. Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, 34, 887–896. doi: <http://doi.org/10.3233/978-1-60750-604-1-887>
- Spectrum Software. Industrial Strength Simulation. Available at: <http://www.spectrum-soft.com/index.shtml>
- Aleksanyan, G. K., Gorbatenko, N. I., Kucher, A. I. (2015). Development And Production Of Multi-Layered Electrode System For Electrical Impedance Tomography Devices. International Journal of Applied Engineering Research, 10 (19), 40580–40584.
- Aleksanyan, G. K., Shcherbakov, I. D., Kucher, A. I. (2017). Feature Research of Using Current Source in 2-Dimensional and 3-Dimensional Multifrequency Electrical Impedance Tomography Devices. Journal of Engineering and Applied Sciences, 12 (3), 587–592.
- Griffiths, H., Zhang, Z. (1989). A dual-frequency electrical impedance tomography system. Physics in Medicine and Biology, 34 (10), 1465–1476. doi: <https://doi.org/10.1088/0031-9155/34/10/009>
- Fokin, A. V., Brazovskiy, K. S. (2008). Current source for electro-impedance tomography. Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov, 313 (4), 99–101.
- Aleksanyan, G. K., Gorbatenko, N. I., Kucher, A. I., Shcherbakov, I. D., Katsupeev, A. A. (2019). Development and Research of a Current Source for Electrical Impedance Tomography. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 9 (2), 3816–3819. doi: <https://doi.org/10.35940/ijeat.b4086.129219>
- Luecke, G. (2005). Analog and Digital Circuits for Electronic Control System Applications. Newnes, 328. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7810-0.x5000-1>

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.207671**

**DEVELOPMENT OF A NEW FORM OF EQUATIONS OF DISTURBED MOTION OF A SATELLITE IN NEARLY CIRCULAR ORBITS (p. 70-77)**

**Alexandr Pirozhenko**

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine,  
 Dnipro, Ukraine

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5240-8604>

**Anna Maslova**

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine,  
 Dnipro, Ukraine

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2115-0847>

**Dmitry Khranov**

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine,  
 Dnipro, Ukraine

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1737-7272>

**Oksana Volosheniuk**

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine,  
 Dnipro, Ukraine

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2658-9306>

**Alexandra Mischenko**

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine,  
 Dnipro, Ukraine

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2412-509X>

The use of simple physical reasoning instead of the method of varying constants has made it possible to elaborate a short scheme of deriving equations of disturbed motion of a satellite in nearly circular orbits. The use of a circular Keplerian orbit as a reference orbit has ensured the nondegeneracy of equations and their simple relation with time. All this taken together has made it possible to propose a



form of equations convenient for carrying out numerical and analytical studies with its variables having a simple physical meaning.

A relationship between the introduced variables and the Keplerian elements of the orbits was described for undisturbed motion. It was shown that the variables describing the deviation of the orbit radius from the radius of the reference orbit are proportional to eccentricity and deviation of the focal parameter is proportional to the square of the eccentricity.

Relationships were constructed that describe the connection between the introduced variables and the Cartesian coordinates of position and velocity in the inertial coordinate system as well as arguments for choosing the radius of the reference orbit. From the condition of equality of energies of motion along circular reference orbit and in elliptical Keplerian orbit, it is expedient to take the radius of the reference orbit equal to the semi-major axis of the Keplerian ellipse.

Approaches to the possible development of the proposed equations were presented. They make it possible to describe changes in the argument of the orbit perigee. The proposed change of variables makes it possible to avoid degeneracy of equations at very small eccentricities when studying the change in the orbit perigee.

The advantages of using the proposed equations for numerical and analytical studies of satellite motion in nearly circular orbits were shown on concrete calculation examples. It was shown that the results of numerical integration in the proposed variables give almost five orders of magnitude less error than the results of the integration of equations in Cartesian coordinates.

**Keywords:** osculating elements, nearly circular orbits, disturbed satellite motion, Keplerian elements.

## References

1. Yamamoto, T., Arikawa, Y., Ueda, Y., Itoh, H., Nishida, Y., Ukawa, S. et al. (2016). Autonomous Precision Orbit Control Considering Observation Planning: ALOS-2 Flight Results. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 39 (6), 1244–1264. doi: <https://doi.org/10.2514/1.g001375>
2. De Florio, S., D'Amico, S., Radice, G. (2013). Flight Results of Precise Autonomous Orbit Keeping Experiment on PRISMA Mission. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 50 (3), 662–674. doi: <https://doi.org/10.2514/1.a32347>
3. Kahle, R., D'Amico, S. (2014). The TerraSAR-X Precise Orbit Control – Concept and Flight Results. Conference: International Symposium on Space Flight Dynamics (ISSFD). Available at: [https://www.researchgate.net/publication/263200500\\_The\\_TerraSAR-X\\_Precise\\_Orbit\\_Control\\_-\\_Concept\\_and\\_Flight\\_Results](https://www.researchgate.net/publication/263200500_The_TerraSAR-X_Precise_Orbit_Control_-_Concept_and_Flight_Results)
4. Troger, H., Alpatov, A. P., Beletsky, V. V., Dranovskii, V. I., Khoroshilov, V. S., Pirozhenko, A. V., Zakrzhevskii, A. E. (2010). *Dynamics of Tethered Space Systems*. Taylor & Francis Group, 245.
5. Vallado, D. A. (2013). *Fundamentals of astrodynamics and applications*. Microcosm Press Year, 1136.
6. Beutler, G. (2005). *Methods of celestial mechanics Vol. I: Physical, Mathematical, and Numerical Principles*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi: <https://doi.org/10.1007/b138225>
7. Maslova, A. I., Pirozhenko, A. V. (2016). Orbit changes under the small constant deceleration. *Kosmichna nauka i tekhnolohiya*, 22 (6), 20–25. doi: <https://doi.org/10.15407/knit2016.06.020>
8. Pirozhenko, A. V., Maslova, A. I., Vasilyev, V. V. (2019). About the influence of second zonal harmonic on the motion of satellite in almost circular orbits. *Kosmichna nauka i tekhnolohiya*, 25 (2), 3–11. doi: <https://doi.org/10.15407/knit2019.02.003>
9. Wakker, K. F. (2015). *Fundamentals of Astrodynamics*. Delft University of Technology, 690.
10. Mazzini, L. (2016). *Flexible Spacecraft Dynamics, Control and Guidance: Technologies by Giovanni Campolo*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25540-8>
11. Duboshin, G. N. (Ed.) (1976). *Spravochnoe rukovodstvo po nebesnoy mehanike i astrodinamike*. Moscow: Nauka, 864.
12. Baù, G., Bombardelli, C., Peláez, J., Lorenzini, E. (2015). Non-singular orbital elements for special perturbations in the two-body problem. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454 (3), 2890–2908. doi: <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2106>
13. Jo, J.-H., Park, I.-K., Choe, N.-M., Choi, M.-S. (2011). The Comparison of the Classical Keplerian Orbit Elements, Non-Singular Orbital Elements (Equinoctial Elements), and the Cartesian State Variables in Lagrange Planetary Equations with J2Perturbation: Part I. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 28 (1), 37–54. doi: <https://doi.org/10.5140/jass.2011.28.1.037>
14. Battin, R. H. (1999). *An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics*. AIAA Education Series. doi: <https://doi.org/10.2514/4.861543>
15. Bond, V. R., Allman, M. C. (1996). *Modern Astrodynamics: Fundamentals and Perturbation Methods*. Princeton University Press, 264.
16. Baù, G., Bombardelli, C., Peláez, J. (2013). A new set of integrals of motion to propagate the perturbed two-body problem. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 116 (1), 53–78. doi: <https://doi.org/10.1007/s10569-013-9475-x>
17. Baù, G., Bombardelli, C. (2014). Time elements for enhanced performance of the DROMO orbit propagator. *The Astronomical Journal*, 148 (3), 43. doi: <https://doi.org/10.1088/0004-6256/148/3/43>
18. Pirozhenko, A. V. (1999). On constructing new forms of equations of perturbed keplerian motion. *Kosmichna nauka i tekhnolohiya*, 5 (2-3), 103–107. doi: <https://doi.org/10.15407/knit1999.02.103>
19. Rosengren, A. J., Scheeres, D. J. (2014). On the Milankovitch orbital elements for perturbed Keplerian motion. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 118 (3), 197–220. doi: <https://doi.org/10.1007/s10569-013-9530-7>
20. Guglielmo, D., Omar, S., Bevilacqua, R., Fineberg, L., Treptow, J., Poffenberger, B., Johnson, Y. (2019). Drag Deorbit Device: A New Standard Reentry Actuator for CubeSats. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 56 (1), 129–145. doi: <https://doi.org/10.2514/1.a34218>
21. Hoyt, R. P., Barnes, I. M., Voronka, N. R., Slostad, J. T. (2009). Terminator Tape: A Cost-Effective De-Orbit Module for End-of-Life Disposal of LEO Satellites. AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. doi: <https://doi.org/10.2514/6.2009-6733>
22. Lucking, C., Colombo, C., McInnes, C. (2011). A passive high altitude deorbiting strategy. 25th Annual IAA/USU Conference on Small Satellites. Available at: [https://strathprints.strath.ac.uk/41234/5/Lucking\\_C\\_Colombo\\_C\\_McInnes\\_CR\\_Pure\\_A\\_passive\\_high\\_altitude\\_deorbiting\\_strategy\\_08\\_Aug\\_2011.pdf](https://strathprints.strath.ac.uk/41234/5/Lucking_C_Colombo_C_McInnes_CR_Pure_A_passive_high_altitude_deorbiting_strategy_08_Aug_2011.pdf)
23. Alpatov, A., Khoroshylov, S., Lapkhanov, E. (2020). Synthesizing an algorithm to control the angular motion of spacecraft equipped with an aeromagnetic deorbiting system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (5 (103)), 37–46. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.192813>
24. Ismailova, A., Zhilisbayeva, K. (2015). Passive magnetic stabilization of the rotational motion of the satellite in its inclined orbit. *Applied Mathematical Sciences*, 9, 791–802. doi: <https://doi.org/10.12988/ams.2015.4121019>
25. Aslanov, V. S., Ledkov, A. S. (2020). Space Debris Attitude Control During Contactless Transportation in Planar Case. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 43 (3), 451–461. doi: <https://doi.org/10.2514/1.g004686>
26. Garulli, A., Giannitrapani, A., Leomanni, M., Scortecchi, F. (2011). Autonomous Low-Earth-Orbit Station-Keeping with Electric Propulsion. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 34 (6), 1683–1693. doi: <https://doi.org/10.2514/1.52985>
27. Bonaventure, F., Baudry, V., Sandre, T., Gicquel, A.-H. (2012). Autonomous Orbit Control for Routine Station-Keeping on a LEO

Mission. Proceedings of the 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics. Available at: [http://issfd.org/ISSFD\\_2012/ISSFD23\\_FDOP2\\_2.pdf](http://issfd.org/ISSFD_2012/ISSFD23_FDOP2_2.pdf)

28. Xu, G., Xu, J. (2012). On the singularity problem in orbital mechanics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429 (2), 1139–1148. doi: <https://doi.org/10.1093/mnras/sts403>

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210378**

**DEVELOPMENT OF THE COMBINED METHOD TO DE-ORBIT SPACE OBJECTS USING AN ELECTRIC ROCKET PROPULSION SYSTEM (p. 78–87)**

**Aleksandr Golubek**

Yuzhnoye Design Office, Dnipro, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7764-6278>

**Mykola Dron'**

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9275-4296>

**Ludmila Dubovik**

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1178-9281>

**Andrii Dreus**

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0598-9287>

**Oleksii Kulyk**

The National Aerospace Educational Center of Youth Named After A. M. Makarov, Dnipro, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2913-4462>

**Petro Khorolskiy**

Yuzhnoye Design Office, Dnipro, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5233-182X>

A method has been developed for the combined de-orbiting of large-size objects of space debris from low-Earth orbits using an electro-rocket propulsion system as an active de-orbiting means.

A principal de-orbiting technique has been devised, which takes into consideration the patterns of using an electric rocket propulsion system in comparison with the sustainer rocket propulsion system.

A procedure for determining the parameters of the de-orbiting scheme has been worked out, such as the minimum total speed and the time of the start of the de-orbiting process, which ensures its achievement. The proposed procedure takes into consideration the impact exerted on the process of the de-orbiting by the ballistic factor of the object, the height of the initial orbit, and the phase of solar activity at the time of the de-orbiting onset. The actual time constraints on battery discharge have been accounted for, as well as on battery charge duration, and active operation of the control system.

The process of de-orbiting a large-size object of space debris has been simulated by using the combined method involving an electro-rocket propulsion system. The impact of the initial orbital altitude, ballistic coefficient, and the phase of solar activity on the energy costs of the de-orbiting process have been investigated. The dependences have been determined of the optimal values of a solar activity phase, in terms of energy costs, at the moment of the de-orbiting onset, and the total velocity, required to ensure the de-orbiting, on the altitude of the initial orbit and ballistic factor. These dependences are of practical interest in the tasks of designing the means of the combined de-orbiting involving an electric rocket propulsion system. The dependences of particular derivatives from the increment of a velocity pulse to the gain in the ballistic factor on the altitude of the initial orbit have been established. The use of these derivatives is also of practical interest to assess the effect of unfolding an aerodynamic sailing unit.

**Keywords:** large-sized space debris, combined de-orbiting, electric rocket propulsion system, low orbits.

**References**

- Liou, J.-C., Kieffer, M., Drew, A., Sweet, A. (2020). The 2019 U.S. Government Orbital Debris Mitigation Standard Practices. *Orbital Debris Quarterly News*, 24 (1), 4–8. Available at: <https://orbitalddebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv24i1.pdf>
- Bastida Virgili, B., Dolado, J. C., Lewis, H. G., Radtke, J., Krag, H., Revelin, B. et. al. (2016). Risk to space sustainability from large constellations of satellites. *Acta Astronautica*, 126, 154–162. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.03.034>
- Liou, J.-C., Johnson, N. L. (2009). A sensitivity study of the effectiveness of active debris removal in LEO. *Acta Astronautica*, 64 (2-3), 236–243. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2008.07.009>
- Drmola, J., Hubik, T. (2018). Kessler Syndrome: System Dynamics Model. *Space Policy*, 44-45, 29–39. doi: <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2018.03.003>
- Kessler, D., Johnson, N., Liou, J.-C., Matney, M. (2010). The Kessler Syndrome: Implications to Future Space operations. *Guidance and Control. 33rd Annual AAS Guidance And Control Conference*. Available at: [https://pdfs.semanticscholar.org/2276/55e022441d1379dfdc395173ed2e776d54ee.pdf?\\_ga=2.116661766.127572570.1598000438-1908018850.1550590803](https://pdfs.semanticscholar.org/2276/55e022441d1379dfdc395173ed2e776d54ee.pdf?_ga=2.116661766.127572570.1598000438-1908018850.1550590803)
- Dron, N. M., Horolsky, P. G., Dubovik, L. G. (2014). Ways of reduction of technogenic pollution of the near-earth space. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 3, 125–130.
- Alpatov, A. P. (2016). *Dinamika kosmicheskikh letatel'nykh apparatov*. Kyiv: Naukova dumka, 488.
- Levin, E., Pearson, J., Carroll, J. (2012). Wholesale debris removal from LEO. *Acta Astronautica*, 73, 100–108. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.11.014>
- Mark, C. P., Kamath, S. (2019). Review of Active Space Debris Removal Methods. *Space Policy*, 47, 194–206. doi: <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2018.12.005>
- Shan, M., Guo, J., Gill, E. (2016). Review and comparison of active space debris capturing and removal methods. *Progress in Aerospace Sciences*, 80, 18–32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.11.001>
- Sánchez-Arriaga, G., Sanmartín, J. R., Lorenzini, E. C. (2017). Comparison of technologies for deorbiting spacecraft from low-earth-orbit at end of mission. *Acta Astronautica*, 138, 536–542. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.12.004>
- Dron', M., Golubek, A., Dubovik, L., Dreus, A., Heti, K. (2019). Analysis of ballistic aspects in the combined method for removing space objects from the nearEarth orbits. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (5 (98)), 49–54. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161778>
- Baranov, A. A., Grishko, D. A., Khukhrina, O. I., Chen, D. (2020). Optimal transfer schemes between space debris objects in geostationary orbit. *Acta Astronautica*, 169, 23–31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.001>
- Dron', M., Khorolskiy, P., Dubovik, L., Hit'ko, A., Velykyi, I. (2012). Estimation of capacity of debris collector with electric propulsion system creation taking in a count energy response of the existing launch vehicles. *Proceedings of the 63th International Astronautical Congress*, 2694–2697.
- DeLuca, L. T., Lavagna, M., Maggi, F., Tadini, P., Pardini, C., Anselmo, L. et. al. (2014). Large Debris Removal Mission in LEO based on Hybrid Propulsion. *Aerotecnica Missili & Spazio*, 93 (1-2), 51–58. doi: <https://doi.org/10.1007/bf03404676>
- Yemets, V., Dron', M., Pashkov, A. (2020). Autophage Engines: Method to Preset Gravity Load of Solid Rockets. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 57 (2), 309–318. doi: <https://doi.org/10.2514/1.a34597>

17. Yemets, M., Yemets, V., Harkness, P., Dron', M., Worrall, K., Pashkov, A. et al. (2018). Caseless throttleable solid motor for small spacecraft. 69th International Astronautical Congress. Bremen, 10924–10933.
18. Yemets, V., Harkness, P., Dron', M., Pashkov, A., Worrall, K., Middleton, M. (2018). Autophage Engines: Toward a Throttleable Solid Motor. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 55 (4), 984–992. doi: <https://doi.org/10.2514/1.a34153>
19. Yemets, V. V., Dron', M. M., Kositsyna, O. S. (2019). Estimation of the possibilities for using the solid hydrocarbon fuels in autophage launch vehicle. *Journal of Chemistry and Technologies*, 27 (1), 58–64. doi: <https://doi.org/10.15421/081906>
20. Dron, M., Dreus, A., Golubek, A., Abramovsky, Yev. (2018). Investigation of aerodynamics heating of space debris object at reentry to Earth atmosphere. 69th International Astronautical Congress. Bremen.
21. Alpatov, A. P., Paliy, O. S., Skorik, O. D. (2017). The Development of Structural Design and the Selection of Design Parameters of Aerodynamic Systems for De-orbiting Upper-stage Rocket Launcher. *Nauka Ta Innovacii*, 13 (4), 33–45. doi: <https://doi.org/10.15407/scin13.03.033>
22. Rasse, B., Damilano, P., Dupuy, C. (2014). Satellite Inflatable Deorbiting Equipment for LEO Spacecrafts. *Journal of Space Safety Engineering*, 1 (2), 75–83. doi: [https://doi.org/10.1016/s2468-8967\(16\)30084-2](https://doi.org/10.1016/s2468-8967(16)30084-2)
23. Roberts, P. C. E., Harkness, P. G. (2007). Drag Sail for End-of-Life Disposal from Low Earth Orbit. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 44 (6), 1195–1203. doi: <https://doi.org/10.2514/1.28626>
24. Visagie, L., Lappas, V., Erb, S. (2015). Drag sails for space debris mitigation. *Acta Astronautica*, 109, 65–75. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.12.013>
25. Lapkhanov, E., Khoroshylov, S. (2019). Development of the aeromagnetic space debris deorbiting system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (101)), 30–37. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179382>
26. Alpatov, A., Khoroshylov, S., Lapkhanov, E. (2020). Synthesizing an algorithm to control the angular motion of spacecraft equipped with an aeromagnetic deorbiting system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (5 (103)), 37–46. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.192813>
27. Kelly, P. W., Bevilacqua, R., Mazal, L., Erwin, R. S. (2018). Tug-Sat: Removing Space Debris from Geostationary Orbits Using Solar Sails. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 55 (2), 437–450. doi: <https://doi.org/10.2514/1.a33872>
28. Lücking, C., Colombo, C., McInnes, C. R. (2012). A passive satellite deorbiting strategy for medium earth orbit using solar radiation pressure and the J2 effect. *Acta Astronautica*, 77, 197–206. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.03.026>
29. Li, P., Zhong, R., Lu, S. (2019). Optimal control scheme of space tethered system for space debris deorbit. *Acta Astronautica*, 165, 355–364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.09.031>
30. Li, G., Zhu, Z. H., Ruel, S., Meguid, S. A. (2017). Multiphysics elastodynamic finite element analysis of space debris deorbit stability and efficiency by electrodynamic tethers. *Acta Astronautica*, 137, 320–333. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.04.025>
31. Bombardelli, C., Pelaez, J. (2011). Ion Beam Shepherd for Contactless Space Debris Removal. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 34 (3), 916–920. doi: <https://doi.org/10.2514/1.51832>
32. Alpatov, A., Khoroshylov, S., Bombardelli, C. (2018). Relative control of an ion beam shepherd satellite using the impulse compensation thruster. *Acta Astronautica*, 151, 543–554. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.06.056>
33. Cichocki, F., Merino, M., Ahedo, E. (2018). Spacecraft-plasma-debris interaction in an ion beam shepherd mission. *Acta Astronautica*, 146, 216–227. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.02.030>
34. Khoroshylov, S. (2019). Out-of-plane relative control of an ion beam shepherd satellite using yaw attitude deviations. *Acta Astronautica*, 164, 254–261. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.08.016>
35. Yang, Y., Klein, E., Sagnières, L. (2020). Tumbling object deorbiting using spaceborne laser engagement – A CubeSat case study. *Advances in Space Research*, 65 (7), 1742–1757. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.01.002>
36. Inamori, T., Kawashima, R., Saisutjarit, P., Sako, N., Ohsaki, H. (2015). Magnetic plasma deorbit system for nano- and micro-satellites using magnetic torquer interference with space plasma in low Earth orbit. *Acta Astronautica*, 112, 192–199. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.02.025>
37. Kirpichnikov, S. N., Ivanova, M. V. (2005). Minimum-fuel impulsive transfers between circular coplanar orbits. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 1. Matematika. Mehanika. Astronomiya*, 1, 79–86.

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209847**

**DEVELOPMENT OF PHYSICAL MODELS FOR THE FORMATION OF ACOUSTIC WAVES AT ARTILLERY SHOTS AND STUDY OF THE POSSIBILITY OF SEPARATE REGISTRATION OF WAVES OF VARIOUS TYPES (P. 6–15)**

**Ye. Dobrynin, V. Volkov, M. Maksymov, V. Boltchenk**

Розроблено та досліджено фізичні моделі формування балістичної і дульної хвилі, що утворюються при артилерійському пострілі. Перспективним методом оцінки ступеня зносу артилерійських стволів є акустичний безконтактний метод. Однак для його здійснення необхідна роздільна реєстрація балістичної хвилі і дульної хвилі. Для оцінки можливості такої реєстрації розроблений ряд фізичних моделей. Побудовано модель для розрахунку параметрів балістичної хвилі, що супроводжує артилерійський постріл. Особливістю запропонованої моделі є заміна задачі про просторове осесиметричне обтікання поверхні снаряда задачею про плоске обтіканні клину. Модель дозволяє визначити значення кута нахилу косоного стрибка до напрямку потоку, що набігає на клин, в залежності від числа Маха. Розрахунок тиску порохових газів, що витікають з дульного зрізу ствола за рядом, заснований на застосуванні закону збереження енергії для стислих порохових газів. Це дозволяє уникнути розв'язання складної модифікованої задачі Лагранжа. Розрахунки показують, що тиск дульної хвилі змінюється в діапазоні (30...300) МПа. Запропоновано фізичну модель поширення дульної хвилі на початковому етапі витікання порохових газів з каналу ствола. У процесі поширення дульної хвилі на початковому етапі можлива ситуація, при якій ця хвиля потрапить в точку реєстрації раніше балістичної хвилі. Така ситуація може мати місце, якщо кути прицілювання і розчину клину малі. При відповідному підборі кута цього явища можна уникнути. Запропонована модель визначає закон поширення дульної хвилі і дозволяє оцінити швидкість її загасання. Встановлено, що вимірювальні мікрофони, які реєструють власне балістичну хвилю, можна розташовувати на відстанях 50...500 м від дульного зрізу. Розроблені моделі корисні на практиці. При роздільній реєстрації балістичної хвилі і дульної хвилі можна оцінити початкову швидкість снаряда і рівень зносу ствола.

**Ключові слова:** артилерійський постріл, балістична хвиля, дульна хвиля, реєстрація акустичних сигналів, мікрофон.

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210665**

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF ACCURACY IN DETERMINING THE DIRECTION TO A PULSED SOURCE OF GAMMA-RADIATION BY A SPHERICAL ABSORBER WITH CdTe DETECTORS IN A SYSTEM OF NUCLEAR SITUATION MONITORING (p. 16–24)**

**I. Cherniavskiy, M. Khomik, V. Tiutiunyk, I. Rolin, V. Starenkiy, M. Tverezovskiy, O. Sheptur, T. Kurtseitov, O. Sali, M. Pidhorodetskiy**

Обґрунтована необхідність та можливість створення дозиметричного каналу визначення напрямку на джерело гамма-випромінювання проникаючої радіації у системі моніторингу ядерної обстановки. У роботі проведена експериментальна оцінка приведеної похибки засобу для визначення напрямку на імпульсні джерела випромінювання з використанням кульового поглинача та CdTe детекторів. Дані детектори можуть бути використані ефективно тільки за наявності відповідної електронної апаратури, збудованої у відповідності з їх характеристиками та спектрально-часовими характеристиками високоінтенсивного імпульсного випромінювання. Визначення напрямку на високоінтенсивне імпульсне випромінювання лінійного прискорювача Varian Clinac 600C (США) телуридкамдієвими детекторами, здійснювалось у імпульсному режимі роботи. Це дозволило провести експеримент по визначенню залежності коефіцієнта пропорційності реєстрації імпульсів з кожного детектора від кута напрямку на джерело імпульсного випромінювання лінійного прискорювача. Оцінка приведеної похибки проводилась шляхом порівняння отриманих експериментальних даних з теоретичною залежністю на підставі фізико-математичної моделі. Рекомендовано весь діапазон кутів від 0° до 360° розділити на п'ять піддіапазонів, в яких за визначення кута в просторі на гамма-джерела відповідають три чи два коефіцієнта пропорційності. Максимальна приведена похибка не перевищує 10 % та максимальна похибка кута до 8,4°. Найбільш точне визначення кута на джерело випромінювання можна провести за наявності теоретично розрахованої та експериментальної бази даних коефіцієнтів пропорційності для всіх кутів в просторі та енергії джерел випромінювання.

**Ключові слова:** визначення напрямку, гамма-випромінювання, напівпровідникові детектори, система моніторингу ядерної обстановки.

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209927**

**EXCHANGE INTERACTION AND MODELS OF CONTACT GENERATION OF DISTURBANCES IN TRIBOSYSTEMS (p. 25–34)**

**Yu. Zaspа, A. Dykha, D. Marchenko, S. Matiukh, Yu. Kukurudzyak**

Розглянуто фізичні механізми утворення і трансформації корпускулярно-віхревих термомоделів збуджень в контактних трибосистемах, засновані на квантово-механічній обмінній взаємодії. Наявність контактної розриву двох термостатів з різними знаками абсолютної температури визначає генерацію пар квазічастинок-збурень, стабілізованих по довжині хвилі і частоті. Внутрішня нестійкість і колапсні процеси в такій системі збурень ведуть до дефектоутворення в матеріалі трибопари

і є причиною аварійних режимів тертя. Наведено конкретні технічні приклади генерації термокомплексів при фреттингу, терті ковзання і кочення, різанні матеріалів. Встановлено, що руйнівний характер процесу фреттингу при низьких значеннях швидкостей реверсивного ковзання обумовлений генерацією і колапсом корпускулярно-віхорхвильових термокомплексів. На прикладі акустичної емісії тертя в ультразвуковій області спектру показаний квантовий характер збурень, що генеруються тертям. Високочастотний спектр акустичної емісії відповідає нерівноважному складу збурень і призводить до формування частинок зносу. Розглянута обмінна взаємодія в трибосистемі з коченням тіла по площині. Результати статистичного аналізу такого кочення показали наявність ефекту від емоного тертя внаслідок квантової генерації довгохвильових збурень. Показано, що колапсна складова генерації збурень значно посилюється в режимах руйнування матеріалів, в тому числі при різанні матеріалів. Описано корпускулярно-віхорхвильовий механізм вибіркового перенесення і водневого зношування в трибосистемах. Показано, що властивості сервоітної плівки в режимі вибіркового перенесення забезпечуються колапсними процесами в системі збурень. Аналогічні процеси при віхорхвильовому перенесенні атомів водню в металах призводять до зношування і руйнування поверхневого шару тертя.

**Ключові слова:** контактна трибодінаміка, корпускулярно-віхорхвильовий термокомплекс, обмінна взаємодія, колапс, акустична емісія.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210232**

**AN EXPERIMENTAL ANALYSIS OF DC MAGNETIC BLOWOUT HIGH-SPEED CIRCUIT BREAKERS' PARAMETERS (p. 35–40)**

**Artur Rojek**

Швидкодіючі вимикачі (HSCB), що використовуються в ланцюгах постійного струму, є одним з основних елементів захисту від перевантаження, короткого замикання та ураження електричним струмом. Такі вимикачі використовуються на транспорті (трамваї, тролейбуси, метро та залізниці) в системах електропостачання та в транспортних засобах. Швидкість роботи і можливість обмеження струму залежать від конструкції швидкодіючих вимикачів і використовуваних в них рішень. На час роботи також впливають параметри системи, зокрема індуктивність, яку вона містить. Крім того, кожне відключення постійного струму в системі RL супроводжується перенапругами, рівень яких залежить від параметрів системи та конструкції вимикача. У статті описано процес вимкнення постійного струму за допомогою швидкодіючих вимикачів з магнітним дуттям, а також фактори, що впливають на швидкість роботи вимикачів – час власний та час гасіння дуги. Описано вплив параметрів ланцюга та конструкції вимикача на напругу дуги. Представлені результати лабораторних випробувань 4-х типів автоматичних вимикачів, які зараз виробляються в Європі. Результати випробувань були використані для аналізу впливу зміни струму в ланцюзі короткого замикання на час відключення струму та значення комутаційних перенапруг – напругу дуги. Представлено результати моделювання короткого замикання в ланцюзі RL постійного струму, виконаного при прийнятій крутизни струмів в ланцюгах. На основі випробувань та моделювання були визначені поточні часи відключення, значення напруги дуги, що утворюються в цьому процесі, та енергія дуги, яка поглинається та розсіюється дуговою камерою. Дослідження та моделювання мали відповісти на питання, чи можна швидко відключити постійний струм без генерування високих значень напруги дуги – перенапруги в ланцюзі, та як повинні формуватись зміни  $di/dt$  швидкодіючим вимикачем для досягнення найкоротшого можливого часу при найменшому значенні напруги дуги та найменшій її енергії.

**Ключові слова:** швидкодіючий вимикач, час відключення, час дуги, напруга дуги.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210769**

**INFLUENCE OF THE SIGNAL DESCRIPTION MODEL ON THE CALCULATIONS OF THE EFFICIENCY INDICATORS OF OPTOELECTRONIC SYSTEM (p. 41–50)**

**T. Strelkova, A. Lytyuga, A. Kalmykov, G. Khoroshun, A. Riazantsev, O. Ryazantsev**

Робота спрямована на встановлення меж застосування моделей опису сигналів в оптико-електронних системах при розрахунках ефективності.

Запропоновано опис процесу формування сигналів з урахуванням корпускулярних і хвильових властивостей при реєстрації сигналів у широкому діапазоні інтенсивностей.

Запропоновано опис статистичних особливостей вихідних сигналів в залежності від енергетичних властивостей сигнальних та шумових компонент. Показано, що при описі вихідних сигналів оптико-електронних систем, які реєструють сигнали з різними властивостями, використовують пуассонівський і гауссів розподіл. Інваріантність пуассонівських потоків зумовлює опис адитивної суміші сигнального і фонового потоків за допомогою пуассонівського потоку.

Розраховано ефективність оптико-електронних систем за критерієм відношення сигнал/шум на основі корпускулярного та хвильового опису сигналів. Розрахунки ефективності показали доцільність використання цього критерію при умові стабілізації статистичних властивостей сигнальних та шумових потоків. Показано, що при умові зміни енергетичних характеристик сигналів, з точки зору хвильової та корпускулярної моделі, статистичні характеристики сигналів мають різні описи.

Проведено аналіз теоретичних методів аналізу сигналів в оптико-електронних системах, який спрямовано на адекватну характеристику роботи системи у залежності від умов її експлуатації. Урахування методу опису процесу приймання та оброблення сигналів дозволяє врахувати додаткові статистичні характеристики сигналів, наприклад збільшення дисперсії вихідного сигналу. Використання адаптивних методів опису сигналів дає можливість збільшити ефективність систем при прийманні сильних сигналів в умовах складної заводої обстановки, а також при прийманні слабких сигналів.

**Ключові слова:** оптико-електронні системи, корпускулярна теорія, хвильова теорія світла, статистична модель, виявлення.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210776

**DEVELOPMENT OF SWITCHING AND MEASUREMENT CIRCUITS FOR PROBLEMS OF ELECTRIC IMPEDANCE TOMOGRAPHY (p. 51–59)**

A. Kucher, N. Narakidze, P. Tjaglicova, M. Filonova

У даній роботі вирішується актуальне завдання вибору оптимальної схеми комутації та вимірювання для задач реконструкції поля зміни провідності біологічного об'єкта.

На підставі аналізу публікацій в області побудови апаратної частини ЕІТ-пристроїв виявлено основні типи систем: послідовна, паралельна та змішана. З огляду на низьку вартість найбільшого поширення набула послідовна архітектура.

Через малий рівень корисного сигналу при дослідженні вентиляції легенів оптимальною визнана диференціальна схема вимірювання, яка дозволяє провести посилення різницевого сигналу. Різницевий сигнал значно змінюється в міру віддалення від електродів, що інжектуються, через що для оптимального використання шкали аналогово-цифрового перетворювача потрібна зміна коефіцієнта посилення в ході збору вимірювальної інформації. Запропоновано схему вимірювання з адаптивним коефіцієнтом посилення. Оптимальний коефіцієнт посилення визначається за результатами тестових вимірювань. Розроблено блок-схему реалізації запропонованого алгоритму.

Розроблено схему комутації вимірювальних електродів, що інжектуються. Це дозволяє проводити інжекування та вимір між будь-якою парою електродів. Проведено теоретичний аналіз впливу параметрів комутаторів. В результаті аналізу виявлено, що основними параметрами, що впливають на метрологічні характеристики, є опір відкритого каналу та його розкид.

В результаті математичного моделювання схеми заміщення каналів інжекування та вимірювання визначено, що опір каналу та його розкид для типових комутаторів призводить до відносної похибки вимірювання потенціалів не більше 0,2 %.

**Ключові слова:** електроімпедансна томографія, реконструкція зображення, медична візуалізація, розподіл провідності, вимір, комутатор.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210774

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A VIRTUAL TEST BENCH FOR ELECTRIC IMPEDANCE TOMOGRAPHY CHANNEL MAIN COMPONENTS SIMULATION (p. 60–69)**

I. Shcherbakov, N. Gorbatenko, R. Polyakov, K. Shirokov

При розробці та визначенні принципів побудови та алгоритмів функціонування пристроїв електроімпедансної томографії необхідна верифікація адекватності прийнятих схемотехнічних рішень, їх технічний рівень і можливість практичної реалізації. Для оцінки технічних можливостей та параметрів роботи пристрою та його складових частин доцільна розробка спеціалізованого інструментарію для проведення досліджень та налаштування. Враховуючи, що пристрої електроімпедансної томографії, що розробляються, є апаратно-програмні рішення, а їх складові частини – це закінчені електронні блоки, які взаємодіють між собою, то представляється можливим розробка експериментального стенду.

Запропоновано розробку віртуального автоматизованого експериментального стенду для проведення попередніх випробувань основних складових частин каналу електроімпедансної томографії. На основі принципів роботи апаратного стенду сформульовані принципи побудови віртуального стенду. Показано відповідність основних елементів апаратного та віртуального стендів в частині їх функціонального призначення.

Для кожного з програмних компонентів віртуального стенда визначені вхідні впливи та вихідні параметри.

Для перевірки працездатності віртуального стенду розроблена принципова схема аналогової частини каналу електроімпедансної томографії. Проведені дослідження показали, що розроблений віртуальний стенд придатний для проведення попередніх випробувань всіх аналогових компонентів каналу.

Використання розробленого віртуального стенду дозволить оптимізувати тимчасові та матеріальні витрати на проведення експериментальних досліджень в процесі розробки апаратного забезпечення технічних засобів електроімпедансної томографії.

**Ключові слова:** електроімпедансна томографія, випробувальний стенд, віртуальний стенд, автоматизовані випробування, експериментальні дослідження.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.207671

**DEVELOPMENT OF A NEW FORM OF EQUATIONS OF DISTURBED MOTION OF A SATELLITE IN NEARLY CIRCULAR ORBITS (p. 70–77)**

A. Pirozhenko, A. Maslova, D. Khramov, O. Volosheniuk, A. Mischenko

Використання простих фізичних міркувань замість методу варіації постійних дозволило провести коротку схему виведення рівнянь збуреного руху супутника на майже кругових орбітах. Використання в якості орбіти порівняння кругової кеплерової орбіти забезпечило невиродженість рівнянь і простий зв'язок їх з часом. Спільно це дозволило запропонувати зручну для проведення чисельних і аналітичних досліджень форму рівнянь, змінні якої мають простий фізичний зміст.

Для незбуреного руху описаний зв'язок введених змінних з кеплеровими елементами орбіти. Показано, що змінні, що описують відхилення радіуса орбіти від радіуса орбіти порівняння пропорційні ексцентриситету, а відхилення фокального параметра – ексцентриситету в квадраті.

Побудовані співвідношення, що описують зв'язок введених змінних з декартовими координатами положення і швидкості в інерціальній системі координат, а також наведені аргументи щодо вибору радіуса орбіти порівняння. З умови рівності енергій руху на

круговій орбіті порівняння і на еліптичній кеплеровій орбіті доцільно прийняти радіус орбіти порівняння рівним великій напіввісі кеплерового еліпсу.

Представлені підходи до можливого розвитку запропонованих рівнянь, що дозволяють описувати зміни аргументу перигею орбіти. Запропонована заміна змінних дозволяє уникнути виродженість рівнянь при дуже малих ексцентриситетах при дослідженні зміни перигею орбіти.

На конкретних розрахункових прикладах показані переваги використання запропонованих рівнянь для чисельних і аналітичних досліджень руху супутника по майже кругових орбітах. Показано, що результати чисельного інтегрування в запропонованих змінних майже на п'ять порядків дають меншу похибку, ніж результати інтегрування рівнянь в декартових координатах.

**Ключові слова:** оскулюючі елементи, майже кругові орбіти, збурений рух супутника, кеплерові елементи.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210378**

**DEVELOPMENT OF THE COMBINED METHOD TO DE-ORBIT SPACE OBJECTS USING AN ELECTRIC ROCKET PROPULSION SYSTEM (p. 78–87)**

**A. Golubek, M. Dron', L. Dubovik, A. Dreus, O. Kulyk, P. Khorolskiy**

Розроблений метод комбінованого відводу великогабаритних об'єктів космічного сміття з низьких навколосемних орбіт з використанням електроракетної рушійної установки в якості активного засобу відводу.

Розроблена принципова схема відводу, яка враховує особливості використання електроракетної рушійної установки.

Розроблена методика визначення параметрів схеми відводу, таких як мінімальна сумарна швидкість і момент часу початку процесу відводу, що забезпечує її досягнення. Методика, що пропонується, враховує вплив на процес відводу балістичного коефіцієнта об'єкта, висоти початкової орбіти і фази сонячної активності в момент початку відводу. Також розглянуті діючі часові обмеження по розряду акумуляторної батареї, простою на час зарядки акумуляторної батареї й активній роботі системи керування.

Проведене імітаційне моделювання процесу відводу великогабаритного об'єкта космічного сміття комбінованим методом з використанням електроракетної рушійної установки. Досліджений вплив висоти початкової орбіти, балістичного коефіцієнта і фази сонячної активності на енергетичні витрати процесу відводу. Визначені залежності оптимальних з точки зору енергетичних витрат значень фази сонячної активності в момент початку відводу і сумарної швидкості, необхідної для забезпечення відводу, від висоти початкової орбіти і балістичного коефіцієнта. Ці залежності мають практичний інтерес для задач проектування засобів комбінованого відводу з використанням електроракетної рушійної установки. Отримані залежності часткових похідних приросту швидкості по приросту балістичного коефіцієнта від висоти початкової орбіти. Використання цих похідних також має практичний інтерес для оцінки ефекту від розгортання аеродинамічного вітрильного пристрою.

**Ключові слова:** великогабаритне космічне сміття, комбінований відвід, електроракетна рушійна установка, низькі орбіти.