

## ABSTRACT AND REFERENCES

## APPLIED MECHANICS

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.314234

**OPTIMIZATION OF THE SOLAR CELL BASED ON CADMIUM TELLURIDE BY ADDING THE CdSeTe ABSORBING LAYER (HETEROSTRUCTURE SIMULATION) (p. 6–12)**

**Hryhorii Ilchuk**Lviv Polytechnic National University,  
Lviv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6647-4343>**Ihor Semkiv**Lviv Polytechnic National University,  
Lviv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3432-8779>**Maryana Karkulovska**Lviv Polytechnic National University,  
Lviv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1348-6148>**Vitalii Vashchynskiy**Lviv Polytechnic National University,  
Lviv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6587-6957>**Mykola Solovyov**Lviv Polytechnic National University,  
Lviv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7678-4049>

Cadmium telluride solar cells are among the most common devices for photovoltaic applications. However, the energy conversion efficiency of these elements remains insufficiently high. Using the SCAPS programming environment, research and optimization of a classical thin-film solar cell based on CdTe were carried out. The structure of this element consisted of ITO as a transparent conductive contact, a cadmium sulfide (CdS) layer, and a cadmium telluride (CdTe) absorber layer with a metal contact. To optimize this structure in terms of power conversion efficiency, the influence of the thickness and concentration of acceptor impurities in the CdTe absorbing layer, as well as the influence of the thickness and concentration of donor impurities in the CdS buffer layer, were considered. It was established that the optimal thicknesses for the CdS buffer layer and absorption CdTe layers are 50 nm and 3000 nm, respectively. An additional CdSeTe layer between the CdS and CdTe layers has been proposed as one of the optimization options to improve the device efficiency. The main photovoltaic parameters of such a solar cell were analyzed depending on the thickness of the CdSeTe layer and its selenium content. It has been demonstrated that adding CdSeTe solid solution to the 1500 nm thick CdTe absorber layer increases the efficiency of the solar cell by 6.84 %. The main photovoltaic characteristics of CdS/CdTe and CdS/CdSeTe/CdTe solar cells were compared. The results showed that the simulated CdS/CdSeTe/CdTe structure provides better photoconversion efficiency in the AM1.5G light spectrum compared to the classical CdS/CdTe structure. Such elements can be used to form highly efficient solar panels.

**Keywords:** solar cell, SCAPS, thin films, heterostructures, cadmium telluride, cadmium chalcogenide.

**References**

- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., Hao, X. (2021). Solar cell efficiency tables (Version 58). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29 (7), 657–667. <https://doi.org/10.1002/pip.3444>
- Thompson, N., Ballen, J. (2017). First Solar. MIT Management Sloan School. Available at: [https://mitsloan.mit.edu/sites/default/files/2020-03/First%20Solar.IC\\_.pdf](https://mitsloan.mit.edu/sites/default/files/2020-03/First%20Solar.IC_.pdf)
- Romeo, A., Artegiani, E. (2021). CdTe-Based Thin Film Solar Cells: Past, Present and Future. *Energies*, 14 (6), 1684. <https://doi.org/10.3390/en14061684>
- Mohamed, H. A. (2015). Optimized conditions for the improvement of thin film CdS/CdTe solar cells. *Thin Solid Films*, 589, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.04.081>
- Morales-Acevedo, A. (2006). Thin film CdS/CdTe solar cells: Research perspectives. *Solar Energy*, 80 (6), 675–681. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.10.008>
- Dharmadasa, I. M., Alam, A. E., Ojo, A. A., Echendu, O. K. (2019). Scientific complications and controversies noted in the field of CdS/CdTe thin film solar cells and the way forward for further development. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30 (23), 20330–20344. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02422-6>
- Yang, X., Liu, B., Li, B., Zhang, J., Li, W., Wu, L., Feng, L. (2016). Preparation and characterization of pulsed laser deposited a novel CdS/CdSe composite window layer for CdTe thin film solar cell. *Applied Surface Science*, 367, 480–484. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.01.224>
- Ibrahim, M., Chelvanathan, P., Miraz, M. H., Alkhamash, H. I., Hasan, A. K. M., Akhtaruzzaman, Md. et al. (2022). Comprehensive study on CdSe thin film as potential window layer on CdTe solar cell by SCAPD-1D. *Chalcogenide Letters*, 19 (1), 33–43. <https://doi.org/10.15251/cl.2022.191.33>
- Li, C., Hu, G., Hao, X., Li, C., Tan, B., Wang, Y. et al. (2021). Performance improvement of CdS/CdTe solar cells by incorporation of CdSe layers. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32 (14), 19083–19094. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06425-0>
- Lingg, M., Buecheler, S., Tiwari, A. N. (2019). Review of CdTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> Thin Films in Solar Cell Applications. *Coatings*, 9 (8), 520. <https://doi.org/10.3390/coatings9080520>
- Paudel, N. R., Yan, Y. (2014). Enhancing the photo-currents of CdTe thin-film solar cells in both short and long wavelength regions. *Applied Physics Letters*, 105 (18). <https://doi.org/10.1063/1.4901532>
- Fiducia, T. A. M., Mendis, B. G., Li, K., Grovenor, C. R. M., Munshi, A. H., Barth, K. et al. (2019). Understanding the role of selenium in defect passivation for highly efficient selenium-alloyed cadmium telluride solar cells. *Nature Energy*, 4 (6), 504–511. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0389-z>
- Poplawsky, J. D., Guo, W., Paudel, N., Ng, A., More, K., Leonard, D., Yan, Y. (2016). Structural and compositional dependence of the CdTe<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> alloy layer photoactivity in CdTe-based solar cells. *Nature Communications*, 7 (1). <https://doi.org/10.1038/ncomms12537>
- Burgelman, M., Nollet, P., Degraeve, S. (2000). Modelling polycrystalline semiconductor solar cells. *Thin Solid Films*, 361-362, 527–532. [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(99\)00825-1](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(99)00825-1)
- Zheng, X., Kuciauskas, D., Moseley, J., Colegrove, E., Albin, D. S., Moutinho, H. et al. (2019). Recombination and bandgap engineering in CdSeTe/CdTe solar cells. *APL Materials*, 7 (7). <https://doi.org/10.1063/1.5098459>
- Doroody, C., Sajedur Rahman, K., Chelvanathan, P., Adib Ibrahim, M., Sopian, K., Amin, N. et al. (2023). Incorporation of Magnesium-doped Zinc Oxide (MZO) HRT Layer in Cadmium Telluride

- (CdTe) Solar Cells. *Results in Physics*, 47, 106337. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.106337>
17. Nykyruy, L. I., Yavorskyi, R. S., Zapukhlyak, Z. R., Wisz, G., Potera, P. (2019). Evaluation of CdS/CdTe thin film solar cells: SCAPS thickness simulation and analysis of optical properties. *Optical Materials*, 92, 319–329. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.04.029>
  18. Bhari, B. Z., Rahman, K. S., Chelvanathan, P., Ibrahim, M. A. (2023). Plausibility of ultrathin CdTe solar cells: probing the beneficial role of MgZnO (MZO) high resistivity transparent (HRT) layer. *Journal of Materials Science*, 58 (40), 15748–15761. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-09001-5>
  19. Filipe, D. I., Chenene, M. L. (2023). Front interface defect signature and benefits of CdSeTe thickness and band gap in CdSeTe/CdTe graded solar cell. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3462048/v2>
  20. Zyoud, S. H., Zyoud, A. H., Ahmed, N. M., Abdelkader, A. F. I. (2021). Numerical Modelling Analysis for Carrier Concentration Level Optimization of CdTe Heterojunction Thin Film–Based Solar Cell with Different Non–Toxic Metal Chalcogenide Buffer Layers Replacements: Using SCAPS–1D Software. *Crystals*, 11 (12), 1454. <https://doi.org/10.3390/cryst11121454>
  21. Liu, X., Abbas, A., Togay, M., Kornienko, V., Greenhalgh, R., Curson, K. et al. (2024). The effect of remnant CdSe layers on the performance of CdSeTe/CdTe photovoltaic devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 267, 112717. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.112717>
  22. Munshi, A. H., Kephart, J., Abbas, A., Raguse, J., Beaudry, J.-N., Barth, K. et al. (2018). Polycrystalline CdSeTe/CdTe Absorber Cells With 28 mA/cm<sup>2</sup> Short-Circuit Current. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8 (1), 310–314. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2017.2775139>

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313878

#### ASSESSING THE POTENTIAL ACCURACY OF A SMALL-SIZED GONIOMETER WITH EXTENDED DYNAMIC RANGE BASED ON NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE (p. 13–25)

Sergiy Ivanov

State University of Information and Communication Technologies,  
Kyiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3001-2451>

This paper evaluates potential accuracy characteristics of a small-sized goniometer based on nuclear magnetic resonance with an extended dynamic range. This required constructing a model of goniometer errors, estimating its accuracy based on this model, and formulating practical recommendations for the design of such a device based on the accuracy assessment.

To evaluate the accuracy of a nuclear goniometer, a theoretical model was built that makes it possible to determine the optimal operating parameters of the cell gas mixture, the ranges of their permissible changes, the sensitivity of the goniometer, and the dependence of its characteristics on external and internal factors. In particular, the dependence of output signal of the device on the parameters of gas mixture and optical pumping has been determined. For a goniometer with a cell volume of 8 cm<sup>3</sup>, the optimum temperature is 130 °C, and the optimum intensity of the pumping radiation is 5 mW.

The dependence of output signal on the measured angle of rotation was also established, as well as the noise and error dependence of the device on the permissible values of its parameters. Based on the model built, parameters of a goniometer with a cell volume of 8 cm<sup>3</sup> were determined; the maximum angular sensitivity of such a goniom-

eter with complete suppression of technical noise is  $\delta\varphi_{sen}=1.0$  arcsec. The greatest contribution to the angle measurement error is from the instability of pumping power  $I_p$  ( $\Delta I_p/I_p=0.05$ ) – 85 %, magnetic field  $B_0$  ( $\Delta B_0/B_0=10^{-8}$ ) – 13 %, temperature  $T$  ( $\Delta T/T=0.1$ ) – 2 %.

The goniometer under consideration corresponds to the medium accuracy class,  $\delta\varphi_{rot}\geq 10$  arcsec. It could be used in optical manufacturing for operational control, calibration, and certification of optical products. To improve the angular accuracy of the goniometer, it is necessary to increase the stability of the laser pumping intensity.

**Keywords:** goniometer, nuclear magnetic resonance, gas cell, optical pumping, Helmholtz coil, Larmor frequency.

#### References

1. Zheng, L., Tang, Q., Ma, X., Zhang, Y. (1996). High-precision static and dynamic angular measurements with a ring laser gyro. *Automated Optical Inspection for Industry*, 2899, 50–53. <https://doi.org/10.1117/12.253053>
2. Pisani, M., Astrua, M., Santiano, M., Beverini, N., Di Virgilio, A., Maccioni, E. et al. (2018). G-LAS: a ring laser gyroscope for high accuracy angle measurements. *Journal of Physics: Conference Series*, 1065, 032009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/3/032009>
3. Wie, Z., Yao, H., Ke, L., Jin, Z., Zi, X. (2022). Calibration and Measurement Method of Laser Gyro Goniometer. *Metrology Science and Technology*, 66 (4), 40–47.
4. Cherepanska, I. Yu., Bezvesilna, O. M., Sazonov, A. Yu. (2019). Precise Intelligent Goniometric System. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 143 (2), 7–14. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-143-2-7-14>
5. Zou, W., Huang, Y., Lin, H., Xue, Z. (2024). New Application and Research of Ring Laser Gyroscope in the Field of Angle Metrology. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73, 1–12. <https://doi.org/10.1109/tim.2024.3449940>
6. Mou, J., Pang, B., Huang, T., Ying, G., Shu, X. (2019). A new method to eliminate the misalignment angle in dynamic goniometer based on fiber optic gyro. *Optik*, 193, 162998. <https://doi.org/10.1016/j.jlleo.2019.162998>
7. Pang, B., Ying, G., Xue, F., Huang, T., Che, S., Shu, X., Mou, J. (2019). Uncertainty analysis of dynamic goniometer based on fiber optic gyroscope. *9th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test, Measurement Technology, and Equipment*, 20, 115. <https://doi.org/10.1117/12.2509290>
8. Ivanov, S. V. (2016). Porivnialnyi analiz efektyvnosti vydiv namotky volokna chutlyvoho elementa volokonno-optychnoho hiroskopa v umovakh zminy temperatury. *Naukovi visti natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut»*, 1, 99–106.
9. Ivanov, S. V., Muravov, V. V., Oliinyk, P. B. (2024). Pat. No. 156304 UA. Honiometr. MPK G01B11/26; No. u202305588; declared: 21.11.2023; published: 05.06.2024, Bul. No. 23.
10. Skinner, J. G., Ranta, K., Whiting, N., Coffey, A. M., Nikolaou, P., Rosen, M. S. et al. (2020). High Xe density, high photon flux, stopped-flow spin-exchange optical pumping: Simulations versus experiments. *Journal of Magnetic Resonance*, 312, 106686. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2020.106686>
11. Cates, G. D., Fitzgerald, R. J., Barton, A. S., Bogorad, P., Gatzke, M., Newbury, N. R., Saam, B. (1992). Rb–129Xe spin-exchange rates due to binary and three-body collisions at high Xe pressures. *Physical Review A*, 45 (7), 4631–4639. <https://doi.org/10.1103/physreva.45.4631>

12. Li, R., Quan, W., Fang, J. (2017). Polarization Measurement of Cs Using the Pump Laser Beam. *IEEE Photonics Journal*, 9 (6), 1–8. <https://doi.org/10.1109/jphot.2017.2761779>

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.310360

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR MONITORING AND OPTIMIZATION OF UNDERGROUND DRAINAGE SYSTEMS USING WIRELESS SENSOR NETWORKS AND ULTRA-WIDEBAND ANTENNAS (p. 26–36)**

**Kabi Yelikbay**

ALT University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3657-1407>

**Pramod Kumar**

CMR Engineering College, Seethariguda, Telangana, India  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2810-2765>

**Ruslan Kassym**

ALT University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
University of Jaén, Jaén, Spain  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8024-5224>

**Tansaule Serikov**

S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7026-7702>

**Maxat Orunbekov**

ALT University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0220-4053>

**Ayinuer Turdy**

ALT University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1809-9340>

**Marzhan Temirbekova**

ALT University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1911-289X>

**Arai Tolegenova**

S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-8328>

**Akmaral Tlenshiyeva**

ALT University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8105-1632>

**Makbal Kassymova**

S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0299-8816>

This research focuses on optimizing ultra-wideband (UWB) antennas, which are critical in modern communication systems due to their wide frequency range (3.1–10.6 GHz) and high data transmission capabilities. The study addresses the challenge of optimizing key antenna parameters – such as return loss, peak gain, and radiation efficiency – while also ensuring energy efficiency and network longevity. Traditional optimization methods, such as LEACH-C, often fail to balance these factors, leading to suboptimal performance.

To solve this problem, the researchers developed the Generalized Position-based Optimization Neural Network (GPON) for UWB antenna optimization. They also evaluated the Position-based Hybrid Neural Network (PAN) method, comparing its performance with existing algorithms including LEACH-C, Firefly Algorithm (FA), HFAPSO, FA-ANN, and HWOABCA. The GPON model reduced return loss to 25.5 dB at 3.5 GHz and improved peak gain to 4.2 dB i, while maintaining 92 % radiation efficiency. In contrast, PAN demonstrated a 15–25 % improvement in residual energy and extended network lifetime by 20 % compared to LEACH-C.

These improvements were due to the integration of advanced neural network techniques in GPON and the effective use of positional data in PAN, enabling more precise and adaptive optimization. The ability to balance multiple performance metrics simultaneously – a challenge previous models struggled with – is a key feature. This balance is crucial for UWB antennas in communication systems where both performance and energy efficiency are vital. The findings are especially relevant for practical applications in wireless sensor networks, mobile communications, and radar systems, requiring long-term network reliability and optimal antenna performance.

**Keywords:** ultra-wideband, antenna optimization, GPON, energy efficiency, network longevity, neural networks.

#### References

- Muragesh, S. K., Rao, S. (2014). Automated internet of things for underground drainage and manhole monitoring system for metropolitan cities. *International Journal of Information & Computation Technology*, 4 (12), 1211–1220. Available at: [https://www.ripublication.com/irph/ijict\\_spl/ijictv4n12spl\\_14.pdf](https://www.ripublication.com/irph/ijict_spl/ijictv4n12spl_14.pdf)
- Haswani, N. G., Deore, P. J. (2018). Web-Based Realtime Underground Drainage or Sewage Monitoring System Using Wireless Sensor Networks. 2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA). <https://doi.org/10.1109/iccubea.2018.8697512>
- See, C. H., Kosha, J., Mshwat, W. A., Abd-Alhameed, R. A., Ong, F. L. C., McEwan, N. J., Excell, P. S. (2019). Design of mobile band subsurface antenna for drainage infrastructure monitoring. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 13 (13), 2380–2385. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2019.0243>
- Huang, G.-L., Zhou, S.-G., Chio, T.-H. (2017). Highly-Efficient Self-Compact Monopulse Antenna System With Integrated Comparator Network for RF Industrial Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64 (1), 674–681. <https://doi.org/10.1109/tie.2016.2608769>
- Liu, G., Wang, Z., Jiang, T. (2016). QoS-Aware Throughput Maximization in Wireless Powered Underground Sensor Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 64 (11), 4776–4789. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2016.2602863>
- Kunsei, H., Bialkowski, K. S., Alam, M. S., Abbosh, A. M. (2018). Improved Communications in Underground Mines Using Reconfigurable Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66 (12), 7505–7510. <https://doi.org/10.1109/tap.2018.2869250>
- Salam, A., Vuran, M. C., Dong, X., Argyropoulos, C., Irmak, S. (2019). A Theoretical Model of Underground Dipole Antennas for Communications in Internet of Underground Things. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67 (6), 3996–4009. <https://doi.org/10.1109/tap.2019.2902646>
- Shakila, R., Paramasivan, B. (2020). RETRACTED ARTICLE: An improved range based localization using Whale Optimization Algorithm in underwater wireless sensor network. *Journal of Ambient In-*

- telligence and Humanized Computing, 12 (6), 6479–6489. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02263-w>
9. Alhawari, A. R. H., Majeed, S. F., Saedi, T., Mumtaz, S., Alghamdi, H., Hindi, A. T. et al. (2021). Compact Elliptical UWB Antenna for Underwater Wireless Communications. *Micromachines*, 12 (4), 411. <https://doi.org/10.3390/mi12040411>
  10. Mir, Z. H., Ko, Y.-B. (2020). Self-Adaptive Neighbor Discovery in Wireless Sensor Networks with Sectorized-Antennas. *Computer Standards & Interfaces*, 70, 103427. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2020.103427>
  11. Ranjan, A., Sahu, H. B., Misra, P. (2020). Modeling and measurements for wireless communication networks in underground mine environments. *Measurement*, 149, 106980. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106980>
  12. Nishikawa, Y., Sasamura, T., Ishizuka, Y., Sugimoto, S., Iwasaki, S., Wang, H. et al. (2018). Design of stable wireless sensor network for slope monitoring. 2018 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet). <https://doi.org/10.1109/wisnet.2018.8311550>
  13. Salam, A., Vuran, M. C., Irmak, S. (2019). Di-Sense: In situ real-time permittivity estimation and soil moisture sensing using wireless underground communications. *Computer Networks*, 151, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.01.001>
  14. Pasupathi, S., Vimal, S., Harold-Robinson, Y., Khari, M., Verdú, E., Crespo, R. G. (2020). Energy efficiency maximization algorithm for underwater Mobile sensor networks. *Earth Science Informatics*, 14 (1), 215–225. <https://doi.org/10.1007/s12145-020-00478-1>
  15. Singh, A., Mehra, R. M., Pandey, V. K. (2020). Design and Optimization of Microstrip Patch Antenna for UWB Applications Using Moth-Flame Optimization Algorithm. *Wireless Personal Communications*, 112 (4), 2485–2502. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07160-1>
  16. Soothar, P., Wang, H., Muneer, B., Dayo, Z. A., Chowdhry, B. S. (2019). A Broadband High Gain Tapered Slot Antenna for Underwater Communication in Microwave Band. *Wireless Personal Communications*, 116 (2), 1025–1042. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06633-2>
  17. Anveshkumar, N., Gandhi, A. S. (2017). Design and performance analysis of a modified circular planar monopole UWB antenna. 2017 8th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 19, 1–5. <https://doi.org/10.1109/icccnt.2017.8203970>
  18. Li, Y.-L., Shao, W., You, L., Wang, B.-Z. (2013). An Improved PSO Algorithm and Its Application to UWB Antenna Design. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, 1236–1239. <https://doi.org/10.1109/lawp.2013.2283375>
  19. Tiemann, J., Pillmann, J., Wietfeld, C. (2017). Ultra-Wideband Antenna-Induced Error Prediction Using Deep Learning on Channel Response Data. 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). <https://doi.org/10.1109/vtcspring.2017.8108571>
  20. Yunus, F., Ariffin, S. H. S., Zahedi, Y. (2010). A Survey of Existing Medium Access Control (MAC) for Underwater Wireless Sensor Network (UWSN). 2010 Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation. <https://doi.org/10.1109/ams.2010.110>
  21. Sultan, A., Yermoldina, G., Kassym, R., Serikov, T., Bekbosynov, S., Yernazarov, N. et al. (2024). Research and construction of an adaptive drive with increased efficiency based on a balancing friction clutch. *Vibroengineering Procedia*, 54, 334–340. <https://doi.org/10.21595/vp.2024.23971>
  22. Bimurzaev, S., Aldiyarov, N., Yerzhigitov, Y., Tlenshiyeva, A., Kassym, R. (2023). Improving the resolution and sensitivity of an orthogonal time-of-flight mass spectrometer with orthogonal ion injection. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (5 (126)), 43–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.290649>
  23. Baibolov, A., Sydykov, S., Alibek, N., Tokmoldayev, A., Turdybek, B., Jurado, F., Kassym, R. (2022). Map of zoning of the territory of Kazakhstan by the average temperature of the heating period in order to select a heat pump system of heat supply: A case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44 (3), 7303–7315. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2108168>
  24. Utegenova, A., Bapyshev, A., Suimenbayeva, Z., Aden, A., Kassym, R., Tansaule, S. (2023). Development system for coordination of activities of experts in the formation of machinescheckable standards in the field of military and space activities based on ontological engineering: a case study. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (2 (125)), 67–77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288542>

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2024.309907**

**DEVELOPMENT MODEL OF A HIGH-PERFORMANCE MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT MICROSTRIP ANTENNA BASED ON A PLANAR SERIES ARRAY WITH 842 ELEMENTS FOR 5G COMMUNICATION SYSTEMS (p. 37–49)**

**Syah Alam**

Universitas Trisakti,  
DKI Jakarta, Indonesia

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0162-8364>

**Indra Surjati**

Universitas Trisakti,  
DKI Jakarta, Indonesia

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6944-0213>

**Lydia Sari**

Universitas Trisakti, DKI Jakarta, Indonesia

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0147-7305>

**Yuli Kurnia Ningsih**

Universitas Trisakti,  
DKI Jakarta, Indonesia

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1940-9143>

**Suryadi Suryadi**

Universitas Trisakti,  
DKI Jakarta, Indonesia

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-0490-1473>

**Teguh Firmansyah**

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa,  
Serang, Banten, Indonesia

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9000-9337>

**Zahriladha Zakaria**

Universiti Teknikal Malaysia Melaka (UTeM),  
Durian Tunggal, Melaka, Malaysia

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1467-405X>

MIMO (Multiple Input Multiple Output) makes a major contribution to 5G communication systems by increasing network capacity and spectrum efficiency. In 5G, MIMO enables the use of multiple antennas at base stations and user devices, allowing simultaneous sending and receiving of data over multiple paths. This significantly increases data throughput and connection reliability, especially in environments with high user density. In addition, MIMO technology supports the implementation

of beamforming, which focuses signals on a specific direction, reduces interference, and improves signal coverage and quality, making it one of the keys to achieving faster and more responsive 5G performance. Therefore, antennas with wide bandwidth, high gain and MIMO performance are crucial for supporting 5G communication systems. This paper proposes a high-performance MIMO microstrip antenna based on a series planar array with  $8 \times 2$  elements operating at a resonant frequency of 3.5 GHz for 5G communication systems. A spiral stub and a feed inset are proposed to control the reflection coefficient and bandwidth of the antenna while the series planar array is proposed to increase the gain. To support the MIMO communication system, the proposed antenna is separated into two different ports with a certain distance. From the measurement results, the proposed antenna has high performance indicated by a wide bandwidth of 680 MHz (3–3.68 GHz) and a high gain of 17.8 dB at a resonant frequency of 3.5 GHz. In addition, the proposed antenna has high mutual coupling and diversity indicated by ECC and DG of 0.001 and 9.99 dB, respectively. This work provides a solution to design a high-performance microstrip antenna and can be implemented as a receiving antenna for 5G communication systems.

**Keywords:** microstrip antenna, high gain, MIMO system, planar array, 5G system.

## References

- Kamal, S., Bin Ain, M. F., Ullah, U., Mohammed, A. S. B., Najmi, F., Hussin, R. et al. (2021). Wheel-shaped miniature assembly of circularly polarized wideband microstrip antenna for 5G mmWave terminals. *Alexandria Engineering Journal*, 60 (2), 2457–2470. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.12.054>
- Fante, K. A., Gameda, M. T. (2021). Broadband microstrip patch antenna at 28 GHz for 5G wireless applications. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 11 (3), 2238. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i3.pp2238-2244>
- Tarpara, N., Rathwa, R. R., Kotak, D. N. A. (2018). Design of Slotted Microstrip patch Antenna for 5G Application. *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 5 (4), 2827–2832.
- Hussain, R., Alreshaid, A. T., Podilchak, S. K., Sharawi, M. S. (2017). Compact 4G MIMO antenna integrated with a 5G array for current and future mobile handsets. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 11 (2), 271–279. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.0738>
- Deng, J., Li, J., Zhao, L., Guo, L. (2017). A Dual-Band Inverted-F MIMO Antenna With Enhanced Isolation for WLAN Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 2270–2273. <https://doi.org/10.1109/lawp.2017.2713986>
- Ojaroudi Parchin, N., Jahanbakhsh Basherlou, H., Al-Yasir, Y. I. A., Ullah, A., Abd-Alhameed, R. A., Noras, J. M. (2019). Multi-Band MIMO Antenna Design with User-Impact Investigation for 4G and 5G Mobile Terminals. *Sensors*, 19 (3), 456. <https://doi.org/10.3390/s19030456>
- Hikmaturokhman, A., Ramli, K., Suryanegara, M. (2018). Spectrum Considerations for 5G in Indonesia. 2018 International Conference on ICT for Rural Development (IC-ICTRuDev). <https://doi.org/10.1109/icitr.2018.8706874>
- Hobbs, S. (2018). Valuing 5G Spectrum: Valuing the 3.5 GHz and C-Band Frequency Range. Coleago Consulting.
- An, W., Li, Y., Fu, H., Ma, J., Chen, W., Feng, B. (2018). Low-Profile and Wideband Microstrip Antenna With Stable Gain for 5G Wireless Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17 (4), 621–624. <https://doi.org/10.1109/lawp.2018.2806369>
- Pratiwi, A. R., Setijadi, E., Hendratoro, G. (2020). Design of Two-Elements Subarray with Parasitic Patch for 5G Application. 2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 7, 311–316. <https://doi.org/10.1109/isitia49792.2020.9163785>
- Tang, X., Jiao, Y., Li, H., Zong, W., Yao, Z., Shan, F. et al. (2019). Ultra-Wideband Patch Antenna for Sub-6 GHz 5G Communications. 2019 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (IWEM). <https://doi.org/10.1109/iwem.2019.8887933>
- Murugan, S. (2021). Compact MIMO Shorted Microstrip Antenna for 5G Applications. *International Journal of Wireless and Microwave Technologies*, 11 (1), 22–27. <https://doi.org/10.5815/ijwmt.2021.01.03>
- Naik, P. S., Virani, H. G. (2020).  $1 \times 4$  Microstrip Patch Slotted Array Antenna for 5G C-Band Access Point Application. 2020 International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC), 1, 641–644. <https://doi.org/10.1109/icesc48915.2020.9156015>
- Aghoutane, B., Das, S., EL Ghzaoui, M., Madhav, B. T. P., El Faylali, H. (2022). A novel dual band high gain 4-port millimeter wave MIMO antenna array for 28/37 GHz 5G applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 145, 154071. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.154071>
- Naga Jyothi Sree, G., Nelaturi, S. (2021). Design and experimental verification of fractal based MIMO antenna for lower sub 6-GHz 5G applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 137, 153797. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.153797>
- Hu, W., Liu, X., Gao, S., Wen, L.-H., Qian, L., Feng, T. et al. (2019). Dual-Band Ten-Element MIMO Array Based on Dual-Mode IFAs for 5G Terminal Applications. *IEEE Access*, 7, 178476–178485. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2958745>
- Xu, K. D., Zhu, J., Liao, S., Xue, Q. (2018). Wideband Patch Antenna Using Multiple Parasitic Patches and Its Array Application With Mutual Coupling Reduction. *IEEE Access*, 6, 42497–42506. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2860594>
- Alam, S., Surjati, I., Sari, L., Anindito, A., Putranto, A. Y., Firmansyah, T. (2021). Bandwidth Enhancement of Array Microstrip Antenna Using Spiral Stub For 5G Communication System. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1 (11), 42–46. <https://doi.org/10.15199/48.2021.11.07>
- Alam, S., Surjati, I., Sari, L., Ningsih, Y. K., Suryadi, S., Trihantoro, G. et al. (2023). Wide band and high gain microstrip antenna using planar series array  $4 \times 2$  element for 5G communication system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (5 (124)), 16–24. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285395>
- Putri, S., Surjati, I., Alam, S., Ningsih, Y. K., Sari, L., Firmansyah, T., Zakaria, Z. (2024). High Isolation of Dual-Band MIMO Microstrip Antenna with Vertical – Horizontal Configuration for 5G Communication System. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1 (4), 89–95. <https://doi.org/10.15199/48.2024.04.17>
- Fang, D. G. (2017). *Antenna Theory and Microstrip Antennas*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10302>
- Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. J., Ittipiboon, A. (2001). *Microstrip antenna design handbook*. ARTECH HOUSE. Available at: <https://uodiyala.edu.iq/uploads/PDF%20ELIBRARY%20UODIYALA/EL37/Microstrip%20Antenna%20Design%20Handbook.pdf>

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313455

**OPTIMIZATION OF DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSORS BASED ON FIBER OPTIC TECHNOLOGIES (p. 50–59)**

Askar Abdykadyrov

RSE “Institute of Mechanics and Engineering named after Academician U. A. Dzhholdasbekova”,

Almaty, Republic of Kazakhstan  
Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1143-4675>

**Nurzhigit Smailov**

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

**Akezhan Sabibolda**

RSE “Institute of Mechanics and Engineering  
named after Academician U. A. Dzholdasbekova”,  
Almaty, Republic of Kazakhstan  
Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1186-7940>

**Gulzhaina Tolen**

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6010-1167>

**Zhandos Dosbayev**

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

**Zhomart Ualiyev**

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

**Rashida Kadyrova**

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

This research investigates distributed acoustic sensors (DAS) based on fiber optic technologies, focusing on the impact of pressure on signal-to-noise ratio (SNR), noise levels, and dominant frequency shifts. DAS systems are widely used for infrastructure monitoring due to their ability to capture acoustic signals over long distances, making them ideal for seismic and pipeline monitoring.

The study examines how fluctuating pressure affects DAS performance, particularly signal quality and noise reduction. In applications like pipeline leak detection and seismic monitoring, pressure changes can degrade signal clarity and complicate anomaly detection. Understanding this relationship is key to optimizing DAS performance and improving system efficiency.

The experiment varied pressure from 0.1 atm to 5 atm, showing that increased pressure raised SNR from 10 dB to 48 dB, reduced noise from 10 dB to 7 dB, and shifted the dominant frequency from 0.5 Hz to 3 Hz. Fourier analysis provided insights into these frequency spectrum changes. Higher pressure compresses the medium, enhancing signal isolation and improving SNR while reducing noise. The frequency shift results from changes in acoustic wave propagation speed under higher pressure, highlighting its role in signal processing.

The key finding is that higher pressure significantly improves signal quality and reduces noise, enhancing DAS performance. The frequency shift improves environmental detection capabilities. These results are valuable for DAS applications in environments with pressure variations, like pipeline monitoring,

where high signal quality is crucial. Improved signal fidelity and frequency shifts make DAS systems more reliable for long-term monitoring and contribute to accurate anomaly detection.

**Keywords:** fiber optic technologies, distributed acoustic sensors, seismic monitoring, infrastructure monitoring.

**References**

1. Udd, E., Spillman, W. B. (Eds.) (2024). *Fiber Optic Sensors*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119678892>
2. Ashry, I., Mao, Y., Wang, B., Hveding, F., Bukhamsin, A., Ng, T. K., Ooi, B. S. (2022). A Review of Distributed Fiber–Optic Sensing in the Oil and Gas Industry. *Journal of Lightwave Technology*, 40 (5), 1407–1431. <https://doi.org/10.1109/jlt.2021.3135653>
3. Hveding, F., Bukhamsin, A. (2018). Distributed Fiber Optic Sensing – A Technology Review for Upstream Oil and Gas Applications. *All Days*. <https://doi.org/10.2118/192323-ms>
4. Mikhailov, P., Ualiyev, Z., Kabdoldina, A., Smailov, N., Khikmetov, A., Malikova, F. (2021). Multifunctional fiber-optic sensors for space infrastructure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (113)), 80–89. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242995>
5. Sekenov, B., Smailov, N., Tashtay, Y., Amir, A., Kuttybayeva, A., Tolemanova, A. (2024). Fiber-Optic Temperature Sensors for Monitoring the Influence of the Space Environment on Nanosatellites: A Review. *Advances in Asian Mechanism and Machine Science*, 371–380. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0_42)
6. Khabay, A., Baktybayev, M., Ibekeyev, S., Sarsenbayev, N., Junussov, N., Zhumakhan, N. (2024). Improvement of fiber optic sensor measurement methods for temperature and humidity measurement in microelectronic circuits. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (5 (129)), 36–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.306711>
7. Parker, T., Shatalin, S., Farhadiroushan, M. (2014). Distributed Acoustic Sensing – a new tool for seismic applications. *First Break*, 32 (2). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2013034>
8. Masoudi, A., Newson, T. P. (2016). Contributed Review: Distributed optical fibre dynamic strain sensing. *Review of Scientific Instruments*, 87 (1). <https://doi.org/10.1063/1.4939482>
9. Hartog, A. H. (2017). *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315119014>
10. Gonzalez-Herraez, M., Fernandez-Ruiz, M. R., Magalhaes, R., Costa, L., Martins, H. F., Becerril, C. et al. (2021). Distributed Acoustic Sensing for Seismic Monitoring. *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021*, 9, Tu1L.2. <https://doi.org/10.1364/ofc.2021.tu1l.2>
11. Dou, S., Lindsey, N., Wagner, A. M., Daley, T. M., Freifeld, B., Robertson, M. et al. (2017). Distributed Acoustic Sensing for Seismic Monitoring of The Near Surface: A Traffic-Noise Interferometry Case Study. *Scientific Reports*, 7 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11986-4>
12. Zhu, H.-H., Liu, W., Wang, T., Su, J.-W., Shi, B. (2022). Distributed Acoustic Sensing for Monitoring Linear Infrastructures: Current Status and Trends. *Sensors*, 22 (19), 7550. <https://doi.org/10.3390/s22197550>
13. Martins, W. A., de Campos, M. L. R., da Silva Chaves, R., Lorde-lo, C. P. V., Ellmauthaler, A., Nunes, L. O., Barfoot, D. A. (2017). Communication Models for Distributed Acoustic Sensing for Telemetry. *IEEE Sensors Journal*, 17 (15), 4677–4688. <https://doi.org/10.1109/jsen.2017.2714023>
14. Wang, Y., Yuan, H., Liu, X., Bai, Q., Zhang, H., Gao, Y., Jin, B. (2019). A Comprehensive Study of Optical Fiber Acoustic Sensing. *IEEE Access*, 7, 85821–85837. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2924736>

15. Cannon, R., Aminzadeh, F. (2013). Distributed Acoustic Sensing: State of the Art. All Days. <https://doi.org/10.2118/163688-ms>
16. Soroush, M., Mohammadtabar, M., Roostaei, M., Hosseini, S. A., Fatahpour, V., Mahmoudi, M. et al. (2022). Downhole Monitoring Using Distributed Acoustic Sensing: Fundamentals and Two Decades Deployment in Oil and Gas Industries. Day 3 Wed, March 23, 2022. <https://doi.org/10.2118/200088-ms>
17. Johannessen, K., Drakeley, B., Farhadiroushan, M. (2012). Distributed Acoustic Sensing - A New Way of Listening to Your Well/Reservoir. All Days. <https://doi.org/10.2118/149602-ms>
18. Lindsey, N. J., Martin, E. R., Dreger, D. S., Freifeld, B., Cole, S., James, S. R. et al. (2017). Fiber Optic Network Observations of Earthquake Wavefields. *Geophysical Research Letters*, 44 (23). <https://doi.org/10.1002/2017gl075722>
19. Zhan, Z. (2019). Distributed Acoustic Sensing Turns Fiber-Optic Cables into Sensitive Seismic Antennas. *Seismological Research Letters*, 91 (1), 1–15. <https://doi.org/10.1785/0220190112>
20. Sladen, A., Rivet, D., Ampuero, J. P., De Barros, L., Hello, Y., Calbris, G., Lamare, P. (2019). Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid Earth interactions on seafloor telecom cables. *Nature Communications*, 10 (1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13793-z>
21. Murayama, H., Wada, D., Igawa, H. (2013). Structural health monitoring by using fiber-optic distributed strain sensors with high spatial resolution. *Photonic Sensors*, 3 (4), 355–376. <https://doi.org/10.1007/s13320-013-0140-5>
22. Eum, S. H., Kageyama, K., Murayama, H., Uzawa, K., Ohsawa, I., Kanai, M. et al. (2007). Structural health monitoring using fiber optic distributed sensors for vacuum-assisted resin transfer molding. *Smart Materials and Structures*, 16 (6), 2627–2635. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/6/067>
23. Fan, X., He, Z., Liu, Q., Chen, D., Wang, S., Yang, G. (2018). Fiber-optic distributed acoustic sensors (DAS) and applications in railway perimeter security. *Advanced Sensor Systems and Applications VIII*, 28, 1. <https://doi.org/10.1117/12.2505342>
24. Ružička, M., Münster, P., Dejdar, P., Jablončík, L. (2021). Distributed optical fiber acoustic sensing system for perimeter security. *Security & Future*, 5 (4), 150–152. Available at: <https://stumejournals.com/journals/confsec/2021/4/150.full.pdf>
25. Kabdoldina, A., Ualiyev, Z., Smailov, N., Malikova, F., Oralkanova, K., Baktybayev, M. et al. (2022). Development of the design and technology for manufacturing a combined fiber-optic sensor used for extreme operating conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (119)), 34–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266359>
26. Smailov, N., Zhadiger, T., Tashtay, Y., Abdykadyrov, A., Amir, A. (2024). Fiber laser-based two-wavelength sensors for detecting temperature and strain on concrete structures. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 7 (4), 1693–1710. <https://doi.org/10.53894/ijirss.v7i4.3481>
27. Kuttybayeva, A., Sabibolda, A., Kengesbayeva, S., Baigulbayeva, M., Amir, A., Sekenov, B. (2024). Investigation of a Fiber Optic Laser Sensor with Grating Resonator Using Mirrors. 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (El-Con). <https://doi.org/10.1109/elcon61730.2024.10468264>
28. Sabibolda, A., Tsymporenko, V., Smailov, N., Tsymporenko, V., Abdykadyrov, A. (2024). Estimation of the Time Efficiency of a Radio Direction Finder Operating on the Basis of a Searchless Spectral Method of Dispersion-Correlation Radio Direction Finding. *Advances in Asian Mechanism and Machine Science*, 62–70. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0_8)
29. Smailov, N., Tsymporenko, V., Sabibolda, A., Tsymporenko, V., Kabdoldina, A., Zhekambayeva, M. et al. (2023). Improving the accuracy

of a digital spectral correlation-interferometric method of direction finding with analytical signal reconstruction for processing an incomplete spectrum of the signal. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (9 (125)), 14–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288397>

30. Sabibolda, A., Tsymporenko, V., Tsymporenko, V., Smailov, N., Zhunussov, K., Abdykadyrov, A. et al. (2022). Improving the accuracy and performance speed of the digital spectral-correlation method for measuring delay in radio signals and direction finding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (9(115)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252561>

**DOI: 10.15587/1729-4061.2024.312489**

**IDENTIFICATION OF CHARACTERISTICS OF CONCEPTUAL PROTOTYPE OF MICROPROCESSOR RESOURCE-SAVING RELAY PROTECTION SYSTEM (p. 60–69)**

**Alexandr Neftissov**

Astana IT University, Astana,  
Republic of Kazakhstan

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4079-2025>

**Ilyas Kazambayev**

Astana IT University, Astana,  
Republic of Kazakhstan

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0850-7490>

**Lalita Kirichenko**

Astana IT University, Astana,  
Republic of Kazakhstan

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7069-5395>

**Dnislam Urazayev**

Nazarbayev University, Astana,  
Republic of Kazakhstan

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4542-2691>

**Andrii Biloshchytskyi**

Astana IT University, Astana,  
Republic of Kazakhstan

Kyiv National University of Construction and Architecture,  
Kyiv, Ukraine

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9548-1959>

**Omirzak Abdirashev**

L. N. Gumilyov Eurasian National University,  
Astana, Republic of Kazakhstan

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7621-5444>

The object of the study is the conceptual prototype of a microprocessor resource-saving relay protection system. Currently, relay protection ensures electrical networks reliable and efficient work, however, the traditional architecture is proprietary, not allowing to fix and replace damaged parts without a company specialist. Therefore, the open-architecture relay protection is a very pressing issue, but the problem lies in meeting the relay protection requirements. The data transmission protocols nRF and ESP-NOW, Hall sensors evaluation for AC current measurement determination and sensor accuracy improvement was implemented. Experimental validation demonstrated that nRF and ESP-NOW protocols meet the delay and reliability requirements, however, the nRF protocol is more suitable due to its flexibility and obstacle penetration. The data demonstrated that the most effective conditions are without obstacles at 15 meters from the modem and with obstacles 5 meters from the modem. The experiment of Hall sensors characteristics determination

demonstrated the accuracy of current measurement with the set values of the opening and closing currents. Nevertheless, it is not accurate (12.45 %) for the relay protection application. Therefore, the application of the changing values of the opening and closing currents is more effective and accuracy reaches 6.92 %. As a result, the service life of the Hall sensor was determined, and even after 10 million openings, the open state time remained unchanged. Therefore, the approximation function for current amplitude determination depending on open state time was found. On the other hand, Hall sensors may suffer from temperature drift and require further optimization to be fully reliable. The study limitation is the current range from 0 to 800 A.

**Keywords:** relay protection, reed switch, Hall sensor, magnetic field, open architecture.

### References

1. Technical report on the events of 9 august 2019. Available at: [https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2019/09/eso\\_technical\\_report\\_-\\_final.pdf](https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2019/09/eso_technical_report_-_final.pdf)
2. Bringing 5G to power. Available at: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/industrylab/reports/bringing-5g-to-power>
3. Biglarbegian, M., Nibir, S. J., Jafarian, H., Parkhideh, B. (2016). Development of current measurement techniques for high frequency power converters. 2016 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). <https://doi.org/10.1109/intelec.2016.7749133>
4. Shen, D., Hu, B., Wang, X., Zhu, M., Wang, L., Lu, W. (2017). Research on Harmonic Characteristic of Electronic Current Transformer Based on the Rogowski Coil. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 199, 012123. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/199/1/012123>
5. Piesciorovsky, E. C., Warmack, R. J. B., Polsky, Y. (2023). Medium-Voltage Testbed for Comparing Advanced Power Line Sensors vs. Measurement Transformers with Electrical Grid Events. *Energies*, 16 (13), 4944. <https://doi.org/10.3390/en16134944>
6. Chen, J., Xu, Q., Wang, K. (2020). Research and Application of Generator Protection Based on Fiber Optical Current Transformer. *IEEE Access*, 8, 172405–172411. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3018734>
7. Parkhomenko, R., Aniskov, O., Tsibulevsky, Y., Melnik, O., Shchokina, O., Kharitonov, A. et al. (2018). Designing a combined device for determining the place of arc discharge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (5 (93)), 12–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.134016>
8. Kletsel, M. Ya., Mashrapov, B. E., Mashrapova, R. M. (2023). Reed switch protection of double-circuit lines without current and voltage transformers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 154, 109457. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109457>
9. Kletsel, M., Mashrapov, B., Mashrapova, R. (2024). Resource-saving microprocessor-based reed switch current protection. *Electric Power Systems Research*, 230, 110276. <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2024.110276>
10. Goryunov, V., Kletsel, M., Mashrapov, B., Mussayev, Z., Talipov, O. (2022). Resource-saving current protections for electrical installations with isolated phase busducts. *Alexandria Engineering Journal*, 61 (8), 6061–6069. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.11.031>
11. Issabekov, D. D., Mussayev, Z. B., Markovskiy, V. P., Kislov, A. P., Urazalimova, D. S. (2024). Reed Switch Overcurrent Protection: New Approach to Design. *Energies*, 17 (11), 2481. <https://doi.org/10.3390/en17112481>
12. Blagojević, M., Jovanović, U., Jovanović, I., Mančić, D. (2017). Folded bus bar current transducer based on Hall effect sensor. *Electrical Engineering*, 100 (2), 1243–1251. <https://doi.org/10.1007/s00202-017-0579-2>
13. Weiss, R., Itzke, A., ReitenspieB, J., Hoffmann, I., Weigel, R. (2019). A Novel Closed Loop Current Sensor Based on a Circular Array of Magnetic Field Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 19 (7), 2517–2524. <https://doi.org/10.1109/jсен.2018.2887302>
14. Xu, Y., Lalwani, A. V., Arora, K., Zheng, Z., Renteria, A., Senesky, D. G., Wang, P. (2022). Hall-Effect Sensor Design With Physics-Informed Gaussian Process Modeling. *IEEE Sensors Journal*, 22 (23), 22519–22528. <https://doi.org/10.1109/jсен.2022.3216499>
15. Neftissov, A., Sarinova, A., Kazambayev, I., Kirichenko, L., Kuchanskyi, O., Faizullin, A. (2023). Determination of the speed of a microprocessor relay protection device of open architecture with a reed switch and the industrial internet of things. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (5 (122)), 20–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276588>
16. Neftissov, A., Sarinova, A., Kazambayev, I., Kirichenko, L., Biloshchytskyi, A., Kislov, A., Andreyeva, O. (2023). Development of the error reducing method for the determination of the alternating current amplitude without the use of current transformers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (125)), 32–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288339>

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313747

### DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF HEAT CONDUCTIVITY FOR MODERN ELECTRONIC DEVICES WITH ELEMENTS CONTAINING FOREIGN INCLUSIONS (p. 70–79)

**Vasyl Havrysh**

Lviv Polytechnic National University,  
Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3092-2279>

**Elvira Dzhumelia**

Lviv Polytechnic National University,  
Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3146-8725>

**Oksana Hrytsai**

Lviv Polytechnic National University,  
Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0710-1675>

**Stepan Kachan**

Lviv Polytechnic National University,  
Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0306-9110>

**Viktoria Maikher**

Lviv Polytechnic National University,  
Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0786-6950>

This paper considers the heat conduction process for an isotropic medium containing a foreign half-through inclusion and heated by a locally concentrated heat flow. Linear and non-linear mathematical models for determining the temperature field have been built to establish the temperature regimes for the effective operation of electronic devices. The coefficient of thermal conductivity of a non-uniform structure is represented as a whole, using asymmetric unit functions, which automatically provides the conditions of ideal thermal contact on the surfaces of materials. This results in solving one heat conduction equation with discontinuous and singular coefficients. A linearizing function was introduced to linearize the nonlinear boundary value problem. Analytical-numerical solutions

of linear and nonlinear boundary-value problems have been obtained in a closed form. A linear temperature dependence of the coefficient of thermal conductivity of structural materials was chosen for a heat-sensitive medium. As a result, an analytical-numerical solution was derived, which determines the temperature distribution in this medium. On this basis, a numerical experiment was performed, the results of which are graphically displayed and confirm the adequacy of the constructed mathematical models to a real physical process.

The materials of the plate and inclusion are silicon and silver. The results for these materials based on the linear and non-linear model differ by 7%. Their slight difference is explained by the fact that the values of the temperature coefficient of thermal conductivity are small. The models built make it possible to analyze the given environments in terms of their thermal resistance. As a result, it becomes possible to improve it, and protect structures from overheating, which could lead to the failure of individual nodes and their elements and the entire electronic device.

**Keywords:** thermal resistance of the structure, foreign half-through inclusion, ideal thermal contact, convective heat exchange.

### References

1. Sheikh, Z. (1994). Where do you the cooling vents. *Electronics cooling*.
2. Zhang, Z., Sun, Y., Cao, X., Xu, J., Yao, L. (2024). A slice model for thermoelastic analysis of porous functionally graded material sandwich beams with temperature-dependent material properties. *Thin-Walled Structures*, 198, 111700. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111700>
3. Zhang, Z., Zhou, D., Fang, H., Zhang, J., Li, X. (2021). Analysis of layered rectangular plates under thermo-mechanical loads considering temperature-dependent material properties. *Applied Mathematical Modelling*, 92, 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.10.036>
4. Peng, X., Li, X., Gong, Z., Zhao, X., Yao, W. (2022). A deep learning method based on partition modeling for reconstructing temperature field. *International Journal of Thermal Sciences*, 182, 107802. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107802>
5. Ren, Y., Huo, R., Zhou, D., Zhang, Z. (2022). Thermo-Mechanical Buckling Analysis of Restrained Columns Under Longitudinal Steady-State Heat Conduction. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47 (3), 1411–1423. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-01020-7>
6. Breukelman, H. J., Santofimia, M. J., Hidalgo, J. (2023). Dataset of a thermal model for the prediction of temperature fields during the creation of austenite/martensite mesostructured materials by localized laser treatments in a Fe-Ni-C alloy. *Data in Brief*, 48, 109110. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109110>
7. Zhang, W., Wu, M., Du, S., Chen, L., Hu, J., Lai, X. (2023). Modeling of Steel Plate Temperature Field for Plate Shape Control in Roller Quenching Process. *IFAC-PapersOnLine*, 56 (2), 6894–6899. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.493>
8. Khan, Z. H., Khan, W. A., Ibrahim, S. M., Mabood, F., Huang, Z. (2024). Effects of thermal boundary conditions on Stokes' second problem. *Results in Physics*, 60, 107662. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.107662>
9. Evstatieva, N., Evstatiev, B. (2023). Modelling the Temperature Field of Electronic Devices with the Use of Infrared Thermography. *2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/atee58038.2023.10108375>
10. Liu, H., Yu, J., Wang, R. (2023). Dynamic compact thermal models for skin temperature prediction of portable electronic devices based on convolution and fitting methods. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 210, 124170. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124170>
11. Ghannad, M., Yaghoobi, M. P. (2015). A thermoelasticity solution for thick cylinders subjected to thermo-mechanical loads under various boundary conditions. *International Journal of Advanced Design & Manufacturing Technology*, 8 (4).
12. Song, H., Song, K., Gao, C. (2019). Temperature and thermal stress around an elliptic functional defect in a thermoelectric material. *Mechanics of Materials*, 130, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.01.008>
13. Parhizkar Yaghoobi, M., Ghannad, M. (2020). An analytical solution for heat conduction of FGM cylinders with varying thickness subjected to non-uniform heat flux using a first-order temperature theory and perturbation technique. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 116, 104684. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104684>
14. Eker, M., Yarımpabuç, D., Çelebi, K. (2020). Thermal stress analysis of functionally graded solid and hollow thick-walled structures with heat generation. *Engineering Computations*, 38 (1), 371–391. <https://doi.org/10.1108/ec-02-2020-0120>
15. Wang, H., Qin, Q. (2019). Thermal Analysis of a Functionally Graded Coating/Substrate System Using the Approximated Transfer Approach. *Coatings*, 9 (1), 51. <https://doi.org/10.3390/coatings9010051>
16. Zhang, Q., Song, H., Gao, C. (2023). The 3-D problem of temperature and thermal flux distribution around defects with temperature-dependent material properties. *Thermal Science*, 27 (5 Part B), 3903–3920. <https://doi.org/10.2298/tsci221003028z>
17. Havrysh, V. I., Kolyasa, L. I., Ukhanska, O. M., Loik, V. B. (2019). Determination of temperature field in thermally sensitive layered medium with inclusions. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 76–82. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-1/5>
18. Havrysh, V. I. (2017). Investigation of Temperature Fields in a Heat-Sensitive Layer with Through Inclusion. *Materials Science*, 52 (4), 514–521. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-9984-y>
19. Havrysh, V. I., Kosach, A. I. (2012). Boundary-value problem of heat conduction for a piecewise homogeneous layer with foreign inclusion. *Materials Science*, 47 (6), 773–782. <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9455-4>
20. Gavrysh, V., Tushnytskyi, R., Pelekh, Y., Pukach, P., Baranetskyi, Y. (2017). Mathematical model of thermal conductivity for piecewise homogeneous elements of electronic systems. *2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, 50, 333–336. <https://doi.org/10.1109/cadsm.2017.7916146>

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.314117

DEVISING A METHOD FOR DETERMINING THE MOISTURE CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF SUBGRADE SOILS TAKING INTO ACCOUNT EUROPEAN APPROACHES AND STANDARDS (p. 80–89)

Andrii Bubela

National Transport University, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5619-003X>

Liudmyla Bondarenko

National Transport University, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8239-065X>

Yevheniia Kvatadze

National Transport University, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2798-8955>

**Vitalii Stozhka**

National Transport University, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5039-9852>

**Andrii Ivko**

Kyiv National University of Construction and Architecture,  
 Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3388-8355>

The object of this study is the theoretical and methodological approaches to determining the coefficient of moisture conductivity of subgrade soils. The work focuses on considering the European approaches and standards when devising a method for determining the coefficient of moisture conductivity of soils.

In the course of the research, a method was developed for determining the coefficient of moisture conductivity of soils  $K_1$ , which characterizes the diffusion movement of water, through the filtration coefficient  $K_0$ , calculated in accordance with European requirements based on laboratory test data.

The proposed method is based on a mathematical model built on the basis of the differential equation of changes in soil moisture. The model is special in that, unlike existing ones, the movement of water was modeled from the bottom up, which reflects the process of moisture accumulation in the lower layers of the subgrade from groundwater or topwater.

A good agreement of the mathematical model with the data by other authors was obtained (the relative error did not exceed 12.98 %).

A direct relationship between the moisture conductivity coefficient of soils  $K_1$  and their initial moisture content  $W_0$  and an inverse relationship between  $K_1$  and the total moisture capacity of soils  $W_{FH}$  were established in the paper. Dependences were derived in the range of changes in initial soil moisture  $W_0$  from 0.08 to 0.15 and  $W_{FH}$  from 0.15 to 0.5. It was found that the values of the moisture conductivity coefficient of soils  $K_1$  increase from  $4.64 \cdot 10^{-6}$  to  $3.81 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/h with an increase in their initial moisture content and with a decrease in total moisture capacity.

From the point of view of engineering practice of road construction, the proposed method makes it possible to predict seasonal changes in soil moisture in the subgrade, to determine the strength of the road structure. This makes it possible to make sound design decisions on the installation of drainage systems on roads in order to extend their service life.

**Keywords:** soil moisture, coefficient of soil moisture conductivity, subgrade, road structure.

## References

1. Sawangsuriya, A., Wachiraporn, S., Sramoon, W. (2015). Soil moisture and strength index for earthwork construction quality control. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 26, 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/26/1/012033>
2. Getachew, D. (2022) Determination of Effect of Moisture Content and Density on Shear Strength Parameters and Slope Stability of Highly Plastic Silt Embankment Soil (the Case of Wozek-Gidole Road). International research journal of engineering and technology, 7, 2333–2346. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/359218718\\_INTERNATIONAL\\_RESEARCH\\_JOURNAL\\_OF\\_ENGINEERING\\_AND\\_TECHNOLOGY\\_IRJET\\_Determination\\_of\\_Effect\\_of\\_Moisture\\_Content\\_and\\_Density\\_on\\_Shear\\_Strength\\_Parameters\\_and\\_Slope\\_Stability\\_of\\_Highly\\_Plastic\\_Silt\\_Emban](https://www.researchgate.net/publication/359218718_INTERNATIONAL_RESEARCH_JOURNAL_OF_ENGINEERING_AND_TECHNOLOGY_IRJET_Determination_of_Effect_of_Moisture_Content_and_Density_on_Shear_Strength_Parameters_and_Slope_Stability_of_Highly_Plastic_Silt_Emban)
3. Nguyen, T. M., Walker, J. P., Ye, N., Kodikara, J. (2023). Use of an L-band radiometer for proximal moisture measurement in road

- construction. Transportation Geotechnics, 38, 100876. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100876>
4. Venmans, A. A. M., van de Ven, R., Kollen, J. (2016). Rapid and Non-intrusive Measurements of Moisture in Road Constructions Using Passive Microwave Radiometry and GPR – Full Scale Test. Procedia Engineering, 143, 1244–1251. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.111>
5. Shan, W., Guo, Y. (2009). The effect of plant root system on temperature and moisture of road cutting slope in seasonal frozen regions. Geophysical Research Abstracts, 11. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/234452799\\_The\\_effect\\_of\\_plant\\_root\\_system\\_on\\_temperature\\_and\\_moisture\\_of\\_road\\_cutting\\_slope\\_in\\_seasonal\\_frozen\\_regions](https://www.researchgate.net/publication/234452799_The_effect_of_plant_root_system_on_temperature_and_moisture_of_road_cutting_slope_in_seasonal_frozen_regions)
6. Uduebor, M., (2023) Engineered water repellency for moisture control in pavement soils. Graduate Research Symposium. Charlotte. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/372162478\\_ENGINEERED\\_WATER\\_REPELLENCY\\_FOR\\_MOISTURE\\_CONTROL\\_IN\\_PAVEMENT\\_SOILS](https://www.researchgate.net/publication/372162478_ENGINEERED_WATER_REPELLENCY_FOR_MOISTURE_CONTROL_IN_PAVEMENT_SOILS)
7. Bondarenko, L., Kvatadze, Y. (2022). Methods of determining the coefficient of moisture conductivity of soils subgrade. Dorogi i Mosti, 2022 (26), 138–146. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.138>
8. ISO 17892-11:2019 (E) Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 11: Permeability tests. Available at: <https://www.iso.org/ru/standard/72016.html>
9. M 42.1-37641918-785:2023 Metodyka vyznachennia koefitsiienta volohoprovodnosti gruntiv zemlianoho polotna na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia (2023). Kyiv, 33. Available at: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=106753](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106753)
10. Puzakov, N. A., Zolotar, Y. A., Sydenko, V. M., Tulaev, A. Ya. et al. (1971). Vodno-teplovoi rezhym zemlianoho polotna y dorozhnikh odezhd. Moscow: Transport, 413.

**DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313114**

## **DETERMINING WORKING CHARACTERISTICS OF THE EXCESS AIR PRESSURE SYSTEM IN AN EMERGENCY HATCH BASED ON JET WATER-GAS EJECTORS (p. 90–99)**

**Serhii Hrynchak**

Naval Institute of the National University  
 “Odesa Maritime Academy”, Odesa, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6627-7780>

The object of this study is jet water and gas ejectors in the fire safety system of ships. The problem solved relates to the fact that in the event of a fire in the area of the exit from the ship's emergency room, the heat energy increases dangerously and a large amount of smoke spreads throughout the ship's rooms. These factors require immediate sealing of the emergency room, which limits the immediate access of emergency teams to the room. Installation of a local excess air pressure system in the emergency hatch on the basis of jet water and gas ejectors could make it possible to shield thermal energy and localize smoke gases in the emergency room without sealing it to ensure prompt access of emergency teams to it. The following results were achieved – the adequacy of theoretical studies of the processes of localization of flue gases in the emergency room without its sealing was confirmed by the experimental method. The investigated problem was solved by optimizing processes: the rate of change in the natural indicator of the weakening of environment during the start-up of the local excess air pressure system in the emergency hatch based on jet water and gas ejectors; the effectiveness of reducing the temperature of heated gases in the superstructure during the operation of the excess air pressure system in the

emergency hatch based on jet water-gas ejectors. Special feature of the results was the formation of an air curtain obtained by the selection of a part of high-temperature flue gases in the housings of jet water-gas ejectors, their heat-mass exchange processing and output back into the flow. This created conditions under which thermal energy is shielded with an efficiency of 85–88 %. The scope and conditions of practical use of the results are shipbuilding and ship fire safety design.

**Keywords:** water-gas jet ejector, emergency hatch, natural attenuation index, thermal energy.

### References

1. Hrynychak, S. (2024). Determining performance characteristics of jet water-gas ejectors for an opening in a vertical fencing structure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (10 (129)), 21–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305828>
2. Miroshnichenko, V. N., Sokolov, V. V., Sheverev, E. Iu. et al. (2002). Issledovanie dymosazhdaiushchei i okhlazhdaiushchei effektivnosti ustroystv UDP GIBK. 065289.001. *Naukovii visnik UkrNDIPB*, 1 (5), 76–82.
3. Zatarinnaia, T. G. (2004). Lokalizatsiia gazovozdushnogo potoka (dyma) vodianoj zavesoi reguliruemoi tolshchiny orosheniia. *Zbirnik naukovikh prac*, 1 (4), 238–243.
4. Kuripko, O. V., Nikitin, E. V., Anokhin, G. A. (2002). Povyshenie ognestoikosti korabelnykh ograzhdaiushchikh konstruktsii: puti i metody issledovaniia. *Zbirnik naukovikh prac*, 1, 164–169.
5. Blintsov, V., Hrynychak, S. (2017). Development of the improved methods of fight against distribution of smoke on ship with systems of jet water-gas ejectors. *EUREKA: Physics and Engineering*, 6, 35–41. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2017.00498>
6. Blintsov, V. S., Hrynychak, S. O. (2017). Theoretical substantiation of the method for designing ship apertures with the use of the air suppression system based on the jet water-gas apparatus. *Collection of Scientific Publications NUS*, 470 (3), 11–20. <https://doi.org/10.15589/jnn20170302>
7. Hrynychak, S. O. (2016). Pat. No. 110777 UA. Sposib pidporu povitria v avariinomu liuku i prystrii dlia yoho realizatsii. MPK A62C 3/00. No. a201206290; declared: 24.05.2012; published: 25.02.2016, *Bul. No. 4*, 4.
8. Mayerhöfer, T. G., Pahlow, S., Popp, J. (2020). The Bouguer-Beer-Lambert Law: Shining Light on the Obscure. *ChemPhysChem*, 21 (18), 2029–2046. <https://doi.org/10.1002/cphc.202000464>
9. Oehlert, G. W. (2010). *A first course in design and analysis of experiments*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 679.
10. Jiju, A. (2014). *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. Elsevier Ltd, 276. <https://doi.org/10.1016/c2012-0-03558-2>
11. *Design of Engineering Experiments*. Available at: <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/engineering/professional-engineering/design-of-engineering-experiments/> Last accessed: 08.04.2024
12. Roy, R. K. (2001). *Design of experiments using the taguchi approach: 16 Steps to product and process improvement*. John Wiley & Sons, Inc., 544.

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.314234

### ОПТИМІЗАЦІЯ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА НА ОСНОВІ ТЕЛУРИДУ КАДМІЮ ШЛЯХОМ ВНЕСЕННЯ ПОГЛИНАЮЧОГО ШАРУ CdSeTe (МОДЕЛЮВАННЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ) (с. 6–12)

Г. А. Льчук, І. В. Семків, М. С. Каркульовська, В. М. Ващинський, М. В. Соловійов

Сонячні елементи на основі телуриду кадмію є одними із найпоширеніших пристроїв для фотоелектричних застосувань. Однак ефективність перетворення енергії цих елементів залишається недостатньо високою. Використовуючи програмне середовище SCAPS проведено дослідження та оптимізацію класичного тонкоплівкового сонячного елемента на основі CdTe. Структура цього елемента складалася з ГТО в якості прозорого провідного контакту, шару сульфїду кадмію (CdS) і шару поглинача телуриду кадмію (CdTe) з металевим контактом. Для оптимізації такої конструкції з точки зору ефективності перетворення потужності, розглянуто вплив товщини та концентрації домішок акцепторів в поглинаючому шарі CdTe, а також вплив товщини та концентрації домішок донорів в буферному CdS шарі. Встановлено, що оптимальні товщини для буферного шару CdS та поглинаючого CdTe шарів відповідно становлять 50 нм та 3000 нм. Як один із варіантів оптимізації для покращення ефективності пристрою запропоновано ввести додатковий шар CdSeTe між шарами CdS та CdTe. Проаналізовано основні фотовольтаїчні параметри такого сонячного елемента в залежності від товщини шару CdSeTe та вмісту в ньому селену. Продемонстровано, що додавання твердого розчину CdSeTe в шар поглинача CdTe товщиною 1500 нм підвищує ефективність сонячного елемента на 6,84 %. Проведено порівняння основних фотовольтаїчних характеристик сонячних елементів CdS/CdTe та CdS/CdSeTe/CdTe. Отримані результати показали, що змодельована структура CdS/CdSeTe/CdTe забезпечує кращу ефективність фотоперетворення у світловому спектрі AM1.5G в порівнянні з класичною CdS/CdTe структурою. Такі елементи можуть використовуватися для формування високоефективних сонячних панелей.

**Ключові слова:** сонячний елемент, SCAPS, тонкі плівки, гетероструктури, телурид кадмію, халькогенід кадмію.

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313878

### ОЦІНКА ПОТЕНЦІЙНОЇ ТОЧНОСТІ МАЛОГАБАРИТНОГО ГОНІОМЕТРА ІЗ РОЗШИРЕНИМ ДИНАМІЧНИМ ДІАПАЗОНОМ НА ОСНОВІ ЯДЕРНОГО МАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ (с. 13–25)

С. В. Іванов

Дослідження присвячено оцінці потенційних точнісних характеристик малогабаритного гоніометра на основі ядерного магнітного резонансу з розширеним динамічним діапазоном. Це потребувало отримання моделі похибок гоніометра, оцінки його точності на основі цієї моделі та формулювання практичних рекомендацій з розробки такого приладу на основі виконаної оцінки точності.

Для проведення оцінки точності ядерного гоніометра розроблено теоретичну модель, яка дозволяє визначити оптимальні робочі параметри газової суміші комірки, діапазони їх допустимих змін, чутливість гоніометра, залежність його характеристик від зовнішніх і внутрішніх факторів. Зокрема, визначено залежність вихідного сигналу приладу від параметрів газової суміші, оптичної накачки. Для гоніометра з коміркою об'ємом 8 см<sup>3</sup> оптимальна температура складає 130 °С, оптимальна інтенсивність випромінювання накачки 5 мВт.

Також визначено залежність вихідного сигналу від вимірюваного кута повороту, проаналізовано шуми та залежність похибки приладу за допустимими значеннями його параметрів. На основі розробленої моделі визначено параметри гоніометра з коміркою об'ємом 8 см<sup>3</sup>; гранична кутова чутливість такого гоніометра при повному придушенні технічних шумів складає  $\delta\varphi_{sen}=1.0$  кут.сек. Найбільший вклад в похибку вимірювання кута вносить нестабільність потужності накачки  $I_p$  ( $\Delta I_p/I_p=0,05$ ) – 85 %; магнітного поля  $B_0$  ( $\Delta B_0/B_0=10^{-8}$ ) – 13 %, температури  $T$  ( $\Delta T/T=0,1$ ) – 2 %.

Розглянутий гоніометр відповідає середньому класу точності,  $\delta\varphi_{tot}\geq 10$  кут.сек. Він може знайти застосування в оптичному виробництві для оперативного контролю, атестації та паспортизації оптичних виробів. Для поліпшення кутової точності гоніометра потрібно підвищувати стабільність інтенсивності лазерного накачування.

**Ключові слова:** гоніометр, ядерний магнітний резонанс, газова комірка, оптичне накачування, катушка Гельмгольца, Ларморова частота.

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.310360

### РОЗРОБКА МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПІДЗЕМНИХ ДРЕНАЖНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ТА УЛЬТРАШИРОКОСМУГОВИХ АНТЕН (с. 26–36)

Kabi Yelikbay, Pramod Kumar, Ruslan Kassym, Tansaule Serikov, Maxsat Orunbekov, Ainur Turdy, Marzhan Temirbekova, Arai Tolegenova, Akmaral Tlenshieva, Makbal Kassymova

Це дослідження зосереджено на оптимізації ультраширококутєвих (УШС) антен, які є критично важливими в сучасних системах зв'язку завдяки їх широкому діапазону частот (3,1–10,6 ГГц) і високим можливостям передачі даних. У дослідженні розглядається

ся проблема оптимізації ключових параметрів антени, таких як зворотні втрати, пікове посилення та ефективність випромінювання, а також забезпечення енергоефективності та довговічності мережі. Традиційні методи оптимізації, такі як LEACH-C, часто не в змозі збалансувати ці фактори, що призводить до неоптимальної продуктивності.

Щоб вирішити цю проблему, було розроблено нейромережу Generalized Position-based Optimization Neural Network (GPON) для оптимізації УШС антени. Здійснено оцінку методу гібридної нейронної мережі на основі позиції (ПНМ), порівнявши його продуктивність з існуючими алгоритмами, включаючи LEACH-C, алгоритм Firefly, HFAPSO, FA-ANN і HWOABCA. Модель GPON зменшила зворотні втрати до 25,5 дБ на 3,5 ГГц і покращила пікове посилення до 4,2 дБ і, зберігаючи ефективність випромінювання на 92 %. Навпаки, PAN продемонстрував покращення залишкової енергії на 15–25 % і подовжив термін служби мережі на 20 % порівняно з LEACH-C.

Ці вдосконалення відбулися завдяки інтеграції передових методів нейронної мережі в GPON і ефективному використанню позиційних даних у ПНМ, що забезпечує більш точну та адаптивну оптимізацію. Здатність збалансувати декілька показників продуктивності одночасно – це проблема, з якою боролися попередні моделі – є ключовою особливістю. Цей баланс має вирішальне значення для УШС антен у системах зв'язку, де продуктивність та енергоефективність є життєво важливими. Висновки особливо актуальні для практичних застосувань у бездротових сенсорних мережах, мобільному зв'язку та радарних системах, що вимагають довгострокової надійності мережі та оптимальної продуктивності антени.

**Ключові слова:** ультраширокий діапазон, оптимізація антени, GPON, енергоефективність, довговічність мережі, нейронні мережі.

---

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.309907

### МОДЕЛЬ РОЗРОБКИ ВИСОКОЕФЕКТИВНОЇ МІКРОСМУЖКОВОЇ АНТЕНИ МІМО НА ОСНОВІ ПЛОСКОЇ ПОСЛІДОВНОЇ РЕШІТКИ З 8Ч2 ЕЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ 5G (с. 37–49)

Syah Alam, Indra Surjati, Lydia Sari, Yuli Kurnia Ningsih, Suryadi, Teguh Firmansyah, Zahriladha Zakaria

Технологія МІМО (Multiple Input Multiple Output) здійснює значний внесок у розвиток систем зв'язку 5G зі збільшенням пропускної здатності мережі та ефективності використання спектру. У системах 5G технологія МІМО дозволяє використовувати кілька антен на базових станціях і пристроях користувачів, забезпечуючи одночасну відправку та прийом даних по декількох каналах. Це дозволяє значно підвищити пропускну здатність і надійність з'єднання, особливо у середовищах з високою щільністю користувачів. Крім того, технологія МІМО підтримує реалізацію технології формування діаграми спрямованості, яка фокусує сигнали в певному напрямку, знижує перешкоди й покращує покриття та якість сигналу, що робить її одним з ключових факторів для підвищення швидкодії та відгуку систем 5G. Таким чином, антени з широкою смугою пропускання, високим коефіцієнтом посилення та ефективністю МІМО мають вирішальне значення для підтримки систем зв'язку 5G. У даній роботі пропонується високоефективна мікросмужкова антена МІМО на основі послідовної плоскої решітки з 8×2 елементами, що працює на резонансній частоті 3,5 ГГц для систем зв'язку 5G. Для регулювання коефіцієнта відбиття та смуги пропускання антени пропонується використовувати спіральний шлейф і фідерну вставку, а для збільшення коефіцієнта посилення – послідовну плоску решітку. Для підтримки системи зв'язку МІМО запропонована антена розділена на два різних порти на певній відстані. Виходячи з результатів вимірювань, запропонована антена має високу ефективність, про що свідчить широка смуга пропускання 680 МГц (3–3,68 ГГц) та високий коефіцієнт посилення 17,8 дБ за резонансної частоти 3,5 ГГц. Крім того, запропонована антена має високий взаємний зв'язок і рознесення, про що свідчать значення ECC і DG, які становлять 0,001 і 9,99 дБ відповідно. Дана робота представляє рішення для проектування високоефективної мікросмужкової антени, що може бути реалізована в якості приймальної антени для систем зв'язку 5G.

**Ключові слова:** мікросмужкова антена, високий коефіцієнт посилення, система МІМО, плоска антенна решітка, система 5G.

---

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313455

### ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛЕНИХ АКУСТИЧНИХ ДАТЧИКІВ НА ОСНОВІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ (с. 50–59)

Askar Abdykadyrov, Nurzhigit Smailov, Akezhan Sabibolda, Gulzhaina Tolen\*, Zhandos Dosbayev, Zhomart Ualiyev, Rashida Kadyrova

Це дослідження досліджує розподілені акустичні датчики (РАД), засновані на волоконно-оптичних технологіях, зосереджуючись на впливі тиску на відношення сигнал/шум (ВСШ), рівні шуму та домінуючі зрушення частоти. Системи РАД широко використовуються для моніторингу інфраструктури завдяки своїй здатності фіксувати акустичні сигнали на великих відстанях, що робить їх ідеальними для сейсмічного моніторингу та моніторингу трубопроводів.

Дослідження вивчає, як коливання тиску впливає на продуктивність РАД, зокрема на якість сигналу та зменшення шуму. У таких програмах, як виявлення витоків у трубопроводі та сейсмічний моніторинг, зміни тиску можуть погіршити чіткість сигналу та ускладнити виявлення аномалій. Розуміння цього зв'язку є ключовим для оптимізації продуктивності РАД і підвищення ефективності системи.

Експеримент змінював тиск від 0,1 атм до 5 атм, показуючи, що підвищення тиску підвищило ВСШ з 10 дБ до 48 дБ, зменшило шум з 10 дБ до 7 дБ і зрушило домінуючу частоту з 0,5 Гц до 3 Гц. Аналіз Фур'є дав зрозуміти ці зміни частотного спектру. Більш високий тиск стискає середовище, покращуючи ізоляцію сигналу та покращуючи ВСШ, одночасно зменшуючи шум. Зсув частоти є результатом зміни швидкості поширення акустичної хвилі під високим тиском, підкреслюючи його роль в обробці сигналу.

Ключовий висновок полягає в тому, що вищий тиск значно покращує якість сигналу та зменшує шум, покращуючи продуктивність РАД. Зсув частоти покращує можливості виявлення навколишнього середовища. Ці результати є цінними для додатків РАД у

середовищах із коливаннями тиску, як-от моніторинг трубопроводів, де висока якість сигналу має вирішальне значення. Покращена точність сигналу та зрушення частоти роблять системи РАД більш надійними для тривалого моніторингу та сприяють точному виявленню аномалій.

**Ключові слова:** волоконно-оптичні технології, розподілені акустичні датчики, сейсмічний моніторинг, моніторинг інфраструктури.

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.312489

### ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПУ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ (с. 60–69)

Alexandr Neftissov, Ilyas Kazambayev, Lalita Kirichenko, Dnislam Urabayev, Andrii Biloshchytskyi, Omirzak Abdirashev

Об'єктом дослідження є концептуальний прототип мікропроцесорної ресурсозберігаючої системи релейного захисту. В даний час релейний захист забезпечує надійну й ефективну роботу електромереж, проте традиційна архітектура є запатентованою, що не дозволяє проводити ремонт та заміну пошкоджених деталей без участі фахівця компанії. Тому релейний захист із відкритою архітектурою є досить актуальним питанням, проте проблема полягає в дотриманні вимог до релейного захисту. Проведено оцінку протоколів передачі даних nRF та ESP-NOW, датчиків Холла для вимірювання величини змінного струму й підвищення точності датчиків. Експериментальна перевірка показала, що протоколи nRF та ESP-NOW відповідають вимогам щодо затримки та надійності, проте протокол nRF є більш підходящим завдяки своїй гнучкості та здатності подолати перешкод. Отримані дані показали, що найбільш ефективними умовами є відсутність перешкод на відстані 15 метрів від модему та наявність перешкод на відстані 5 метрів від модему. Експеримент з визначення характеристик датчиків Холла показав точність вимірювання струму при заданих значеннях струмів розмикання й замикання. Однак він не є точним (12,45 %) для застосування в релейному захисті. Тож застосування змінних значень струмів розмикання й замикання є більш ефективним, а точність досягає 6,92 %. В результаті було визначено термін служби датчика Холла, і навіть після 10 мільйонів розмикань час перебування в розімкнутому стані залишався незмінним. Таким чином, була знайдена апроксимуюча функція для визначення амплітуди струму в залежності від часу перебування в розімкнутому стані. З іншого боку, датчики Холла можуть страждати від температурного дрейфу й вимагають подальшої оптимізації для забезпечення повної надійності. Обмеженням дослідження є діапазон струму від 0 до 800 А.

**Ключові слова:** релейний захист, геркон, датчик Холла, магнітне поле, відкрита архітектура.

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313747

### РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИСТРОЇВ З ВКЛЮЧЕННЯМИ (с. 70–79)

В. І. Гавриш, Е. А. Джумеля, О. Д. Грицай, С. І. Качан, В. Ю. Майхер

Розглянуто процес теплопровідності для ізотропного середовища, що містить чужорідне напівнаскрізне включення, та нагрівається локально зосередженим тепловим потоком. Для встановлення температурних режимів ефективної роботи електронних пристроїв розроблено лінійну і нелінійну математичні моделі визначення температурного поля. Коефіцієнт теплопровідності неоднорідної конструкції подано як ціле, з використанням асиметричних одиничних функцій, що автоматично забезпечує умови ідеального теплового контакту на поверхнях стику матеріалів. Це приводить до розв'язування одного рівняння теплопровідності з розривними та сингулярними коефіцієнтами. Для лінеаризації нелінійної крайової задачі запроваджено лінеаризуючу функції. У замкнутому вигляді отримано аналітично-числові розв'язки лінійної і нелінійної крайових задач. Для термочутливого середовища вибрано лінійну температурну залежність коефіцієнта теплопровідності конструкційних матеріалів. У результаті отримано аналітично-числовий розв'язок, який визначає розподіл температури у цьому середовищі. На цій основі виконано числовий експеримент, результати якого графічно відображені та підтверджують адекватність розроблених математичних моделей реальному фізичному процесу.

Матеріалом пластини та включення виступають кремній та срібло. Отримані результати для цих матеріалів за лінійною і нелінійною моделлю відрізняються на 7 %. Незначна їх відмінність пояснюється тим, що значення температурного коефіцієнта теплопровідності є невеликими. Розроблені моделі дають змогу аналізувати наведені середовища щодо їх термостійкості. Унаслідок, стає можливим її підвищити, а конструкції захистити від перегрівання, яке може привести до виходу з ладу окремих вузлів та їх елементів і цілого електронного пристрою.

**Ключові слова:** термостійкість конструкції, чужорідне напівнаскрізне включення, ідеальний тепловий контакт, конвективний теплообмін.

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.314117

### РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВОЛОГОПРОВІДНОСТІ ҐРУНТІВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА З УРАХУВАННЯМ ЄВРОПЕЙСЬКИХ ПІДХОДІВ І СТАНДАРТІВ (с. 80–89)

А. В. Бубела, Л. П. Бондаренко, Є. І. Кватадзе, В. В. Стьожка, А. В. Івко

Об'єктом досліджень є теоретико-методичні підходи до визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів земляного полотна. Основний фокус роботи спрямований на врахування європейських підходів і стандартів при розробленні методу визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів.

У ході досліджень розроблено метод визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів  $K_1$ , що характеризує дифузійний рух води, через фільтраційний коефіцієнт  $K_0$ , розрахований відповідно до європейських вимог за даними лабораторних випробувань.

Запропонований метод базується на математичній моделі, отриманій на основі диференціального рівняння зміни вологості в ґрунті. Модель особлива тим, що на відміну від існуючих, рух води моделювався знизу вгору, що відображає процес вологонакопичення в нижніх шарах земляного полотна від ґрунтових вод або верховодки.

Отримано гарне узгодження математичної моделі з даними інших авторів (відносна похибка не перевищила 12.98 %).

В роботі отримано пряму залежність між коефіцієнтом вологопровідності ґрунтів  $K_1$  і їх початковою вологістю  $W_0$  та обернену залежність між  $K_1$  і повною вологоємністю ґрунтів  $W_{ПВ}$ . Залежності отримано в діапазоні зміни початкової вологості ґрунту  $W_0$  від 0.08 до 0.15 та  $W_{ПВ}$  від 0.15 до 0.5. Встановлено, що значення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів  $K_1$  збільшуються від  $4,64 \cdot 10^{-6}$  до  $3,81 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/год при збільшенні їх початкової вологості та при зменшенні повної вологоємності.

З точки зору інженерної практики дорожнього будівництва, запропонований метод дає можливість прогнозувати сезонні зміни вологості ґрунтів земляного полотна, визначати міцність дорожньої конструкції. Це дозволяє приймати обґрунтовані проектні рішення щодо влаштування дренажних систем на автошляхах задля подовження строку їх експлуатації.

**Ключові слова:** вологість ґрунту, коефіцієнт вологопровідності ґрунту, земляне полотно, дорожня конструкція.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313114**

## **ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ ПІДПОРУ ПОВІТРЯ В АВАРІЙНОМУ ЛЮКУ НА БАЗІ СТРУМИННИХ ВОДОГАЗОВИХ ЕЖЕКТОРІВ (с. 90–99)**

**С. О. Гринчак**

Об'єктом досліджень є струминні водогазові ежектори в системі забезпечення протипожежної безпеки кораблів. Проблема, що вирішувалася, – при пожежі в районі виходу з аварійного приміщення судна небезпечно підвищується теплова енергія і велика кількість диму поширюється по приміщеннях судна. Ці чинники вимагають негайної герметизації аварійного приміщення, що обмежує оперативний доступ аварійних команд в приміщення. Встановлення системи місцевого підпору повітря в аварійному люку на базі струминних водогазових ежекторів дозволить екранувати теплову енергію і локалізувати димові гази в аварійному приміщенні без його герметизації для забезпечення оперативного доступу аварійних команд до нього. Досягнуті наступні основні результати – підтверджено експериментальним методом адекватність теоретичних досліджень процесів локалізації димових газів в аварійному приміщенні без його герметизації. Досліджувана проблема була вирішена шляхом оптимізації процесів: швидкості зміни натурального показника послаблення середовища під час запуску місцевої системи підпору повітря в аварійному люку на базі струминних водогазових ежекторів; ефективності зниження температури нагрітих газів в надбудові при роботі системи підпору повітря в аварійному люку на базі струминних водогазових ежекторів. Особливістю отриманих результатів стало формування повітряної завіси, отриманої шляхом відбору частини високотемпературних димових газів у корпуси струминних водогазових ежекторів, їх тепломасообмінної обробки та виводу назад у потік. Це створило умови, при яких екранування теплової енергії відбувається з ефективністю 85–88 %. Сфера та умови практичного використання отримані результатів – суднобудування та проектування протипожежної суднової безпеки.

**Ключові слова:** водогазовий струминний ежектор, аварійний люк, натуральний показник послаблення середовища, теплова енергія.