

## ABSTRACT AND REFERENCES

## INFORMATION AND CONTROLLING SYSTEM

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.356495

**DEVELOPMENT OF CRYPTO-CODE CONSTRUCTIONS ON HYPERELLIPTIC CURVES (p. 6–18)****Olena Akhiezer**National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,  
Kharkiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7087-9749>**Oleksandr Kushnerov**

Sumy State University, Sumy, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8253-5698>**Hanna Nelasa**

Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3708-0089>**Olha Korol**National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,  
Kharkiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-9984>**Klym Yamkovyi**National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,  
Kharkiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9512-4150>**Oleksandr Voitko**

National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4610-4476>**Vladyslav Sokol**National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,  
Kharkiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9446-2049>**Olena Voloshchuk**

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5912-4126>**Oleksandr Novoseletskyi**

National University of Ostroh Academy, Ostroh, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3757-0552>**Oleh Nelasyi**

Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4475-1888>

The subject of this study is the algebraic processes of data formation, encoding and syndrome decoding in cryptographic code constructions based on hyperelliptic curves of higher genera over Galois fields. The problem addressed lies in the excessive computational complexity and energy consumption of post-quantum asymmetric cryptosystems, which precludes their use on hardware platforms with resource constraints. The results obtained include the construction of a mathematical model of an algebraic-geometric code in projective coordinates, the development of a point mapping algorithm, and the generation of sparse matrices. The implementation of hyperelliptic structures into the symmetric Rao-Nama scheme has enabled a reduction in energy consumption of 20–60% compared to the asymmetric McEly's scheme. The increase in the overall efficiency of the system is explained by the complete elimination of the resource-intensive operation of inverting Galois field elements thanks to an isomorphic transition to projective space, as well as the complete avoidance of solving matrix equations during the process of decrypting crypto-

grams. The distinctive features of the results obtained, which enabled the solution of the problem under investigation, lie in the fact that the targeted selection of row vectors for the evaluation matrices allowed the Hamming weight of the code to be artificially minimized. At the same time, the synergy of multidimensional algebraic geometry with symmetric architecture ensured an approximation to linear time complexity of decoding. The scope and conditions for the practical application of the results obtained cover the use of synthesized cryptographic code constructs in nodes of modern cyber-physical systems and Internet of Things (IoT) networks under conditions of severe computational resource constraints and autonomous power supply limits.

**Keywords:** post-quantum cryptography, hyperelliptic curve, cryptographic code construction, Rao-Nama scheme, algebraic-geometric code.

**References**

- Yevseiev, S., Rzayev, K., Korol, O., Imanova, Z. (2016). Development of mceliece modified asymmetric crypto-code system on elliptic truncated codes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (9 (82)), 18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75250>
- Yevseiev, S., Tsyhanenko, O., Ivanchenko, S., Alekseyev, V., Verheles, D., Volkov, S. et al. (2018). Practical implementation of the Niederreiter modified cryptocode system on truncated elliptic codes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (4 (96)), 24–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150903>
- Yevseiev, S., Hryhorii, K., Liekariiev, Y. (2016). Developing of multi-factor authentication method based on niederreiter-mceliece modified crypto-code system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (4 (84)), 11–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86175>
- Yevseiev, S., Korol, O., Kots, H. (2017). Construction of hybrid security systems based on the crypto-code structures and flawed codes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (9 (88)), 4–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108461>
- Alimoradi, R. (2016). A Study of Hyperelliptic Curves in Cryptography. *International Journal of Computer Network and Information Security*, 8 (8), 67–72. <https://doi.org/10.5815/ijcnis.2016.08.08>
- Sato, K., Onuki, H., Takagi, T. (2024). Explicit addition formulae on hyperelliptic curves of genus 2 for isogeny-based cryptography. *JSIAM Letters*, 16, 65–68. <https://doi.org/10.14495/jsiaml.16.65>
- Fan, J., Fan, X., Song, N., Wang, L. (2022). Hyperelliptic Covers of Different Degree for Elliptic Curves. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/9833393>
- Furukawa, E., Kawazoe, M., Takahashi, T. (2004). Counting Points for Hyperelliptic Curves of Type  $y^2 = x^5 + ax$  over Finite Prime Fields. *Selected Areas in Cryptography*, 26–41. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-24654-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24654-1_3)
- Hubrechts, H. (2011). Memory efficient hyperelliptic curve point counting. *International Journal of Number Theory*, 07 (01), 203–214. <https://doi.org/10.1142/s1793042111004034>
- Xiong, M., Zaharescu, A. (2012). Statistics of the Jacobians of hyperelliptic curves over finite fields. *Mathematical Research Letters*, 19 (2), 255–272. <https://doi.org/10.4310/mrl.2012.v19.n2.a1>
- Kurlberg, P., Rudnick, Z. (2009). The fluctuations in the number of points on a hyperelliptic curve over a finite field. *Journal of Number Theory*, 129 (3), 580–587. <https://doi.org/10.1016/j.jnt.2008.09.004>
- Chinis, I. J. (2016). Traces of high powers of the Frobenius class in the moduli space of hyperelliptic curves. *Research in Number Theory*, 2 (1). <https://doi.org/10.1007/s40993-016-0043-9>

13. Conceição, R. (2020). On integral points on isotrivial elliptic curves over function fields. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 102 (2), 177–185. <https://doi.org/10.1017/s0004972720000155>
14. Katz, E., Rabinoff, J., Zureick-Brown, D. (2016). Uniform bounds for the number of rational points on curves of small Mordell-Weil rank. *Duke Mathematical Journal*, 165 (16). <https://doi.org/10.1215/00127094-3673558>
15. Abbasi, M., Cardoso, F., Váz, P., Silva, J., Martins, P. (2025). A Practical Performance Benchmark of Post-Quantum Cryptography Across Heterogeneous Computing Environments. *Cryptography*, 9 (2), 32. <https://doi.org/10.3390/cryptography9020032>
16. Pohasii, S., Yevseiev, S., Zhuchenko, O., Milov, O., Lysechko, V., Kovalenko, O. et al. (2022). Development of crypto-code constructs based on LDPC codes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (116)), 44–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254545>
17. Yevseiev, S., Tsyhanenko, O., Gavrilo, A., Guzhva, V., Milov, O., Moskalenko, V. et al. (2019). Development of Niederreiter hybrid crypto-code structure on flawed codes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (9 (97)), 27–38. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156620>
18. Yevseiev, S., Gavrilo, A., Tomashevsky, B., Samadov, F. (2019). Research of crypto-code designs construction for using in post quantum cryptography. *Development Management*, 16 (4), 26–39. [https://doi.org/10.21511/dm.4\(4\).2018.03](https://doi.org/10.21511/dm.4(4).2018.03)

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.355853

#### DEVISING A METHOD FOR DYNAMIC STABILIZATION OF PoS CONSENSUS USING ADAPTIVE WEIGHT MIXING AND A TIME FACTOR (p. 19–28)

Ihor Solomka

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3705-8801>

Bohdan Liubinskyi

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0715-8068>

This study investigates the process of validator committee selection in permissionless blockchain networks operating on the Proof-of-Stake algorithm. The task addressed relates to the vulnerability of conventional static selection schemes to identity-forging (Sybil) attacks.

A fixed baseline weight facilitates stake splitting among numerous fictitious entities, allowing attackers to gain control over the network. In response to these challenges, a method for the dynamic stabilization of consensus based on an adaptive control law has been devised. This method automatically regulates the weight mixing intensity using the smoothed Gini coefficient.

The concept of Proof-of-Persistence has been proposed, which replaces the uniform baseline distribution with a time-weighted reputation of the participants. The analytical and experimental analyses of data from 10 real-world networks were conducted, demonstrating that the proposed mechanism reliably reduces the aggregate weight of a potential attacker. The result is attributed to the fact that when new entities are created, their prior participation experience is not considered, and the loss of reputational weight outweighs the benefits of acquiring new baseline shares. This makes the stake-splitting strategy economically unviable.

An important distinct feature is that the system's adaptation is carried out exclusively on the basis of deterministic on-chain data, without the need for external identification. The proposed system functions autonomously: under a normal mode, intervention is mini-

mized, while under the risk of an oligopoly, protection is strengthened. The results could be practically applied to the architecture of permissionless blockchain networks as the method might be integrated both at the network protocol core level and in the form of smart contracts to enhance the security of distributed ledgers without additional manual adjustments.

**Keywords:** Proof-of-Stake, Sybil resistance, adaptive consensus, committee selection, Gini coefficient, Proof-of-Persistence.

#### References

1. Xu, J., Wang, C., Jia, X. (2023). A Survey of Blockchain Consensus Protocols. *ACM Computing Surveys*, 55 (13s), 1–35. <https://doi.org/10.1145/3579845>
2. Motepalli, S., Jacobsen, H.-A. (2024). How Does Stake Distribution Influence Consensus? Analyzing Blockchain Decentralization. 2024 IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency (ICBC), 343–352. <https://doi.org/10.1109/icbc59979.2024.10634400>
3. Saleh, F. (2020). Blockchain without Waste: Proof-of-Stake. *The Review of Financial Studies*, 34 (3), 1156–1190. <https://doi.org/10.1093/rfs/hhaa075>
4. Roşu, I., Saleh, F. (2021). Evolution of Shares in a Proof-of-Stake Cryptocurrency. *Management Science*, 67 (2), 661–672. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2020.3791>
5. Motepalli, S., Jacobsen, H.-A. (2025). Decentralization in PoS Blockchain Consensus: Quantification and Advancement. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 22 (4), 2930–2943. <https://doi.org/10.1109/tnsm.2025.3561098>
6. Cevallos, A., Stewart, A. (2021). A verifiably secure and proportional committee election rule. *Proceedings of the 3rd ACM Conference on Advances in Financial Technologies*, 29–42. <https://doi.org/10.1145/3479722.3480988>
7. Leporati, A., Roviada, L. (2024). Looking for stability in proof-of-stake based consensus mechanisms. *Blockchain: Research and Applications*, 5 (4), 100222. <https://doi.org/10.1016/j.bcr.2024.100222>
8. Huang, H., Peng, X., Lin, Y., Xu, M., Ye, G., Zheng, Z., Guo, S. (2023). Scheduling Most Valuable Committees for the Sharded Blockchain. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 31 (6), 3284–3299. <https://doi.org/10.1109/tnet.2023.3278456>
9. Windiatmaja, J. H., Hanggoro, D., Salman, M., Sari, R. F. (2023). PoIR: A Node Selection Mechanism in Reputation-Based Blockchain Consensus Using Bidirectional LSTM Regression Model. *Computers, Materials & Continua*, 77 (2), 2309–2339. <https://doi.org/10.32604/cmc.2023.041152>
10. Zhang, M., Liu, M., Ding, X., Wang, Y., Li, G. (2025). GPE-PoS: A Fair and Sybil-Resistant Proof of Stake Consensus. *Journal of Internet Technology*, 26 (4), 463–470. <https://doi.org/10.70003/160792642025072604005>
11. Castañeda, A., Hurault, A., Quéinnec, P., Roy, M. (2019). Tasks in Modular Proofs of Concurrent Algorithms. *Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems*, 69–83. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34992-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34992-9_6)
12. Iqbal, M., Matulevicius, R. (2021). Exploring Sybil and Double-Spending Risks in Blockchain Systems. *IEEE Access*, 9, 76153–76177. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3081998>
13. Solomka, I. R., Liubinskyi, B. B., Peniak, B. O. (2025). Mixed-Weight Committee Selection in Proof-of-Stake: Tunable Stake-Baseline Mixing with Exponential Tail Guarantees and Incentive Compatibility. *Mathematical Modeling and Computing*, 12 (4), 1320–1332. <https://doi.org/10.23939/mmc2025.04.1320>
14. Ihoso. Mixweight-committee-consensus. Self-Stabilizing Consensus. Available at: <https://github.com/ihosol/mixweight-committee-consensus/tree/feature/self-stabilized-consensus/self-stabilizing-consensus>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.357607

## IMPROVING A METHOD OF RATIONAL PLACEMENT OF BASE STATIONS IN A GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM DIFFERENTIAL CORRECTION SYSTEM (p. 29–39)

**Hennadii Khudov**

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3311-2848>

**Igor Taran**

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1327-9170>

**Serhii Lohachov**

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5609-5158>

**Kostiantyn Kulahin**

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1189-5623>

**Oleh Rybachuk**

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2459-8468>

This study investigates the process of deploying base stations of the global navigation satellite system's differential correction system. The task addressed is to reduce complexity of the differential correction system by optimizing the number and placement of base stations in the global navigation satellite system.

The method for the rational placement of base stations of the global navigation satellite system's differential correction system has been improved. In contrast to known ones, it involves the following:

- initially filling the predefined area with Voronoi diagram pole points;
- constructing the Voronoi diagram;
- finding the centroids of the resulting cells as the positions of the centers of the Voronoi cells;
- verifying that the condition for changing the positions of the centroids is satisfied;
- verifying that the condition for finding the centroids within prohibited zones is met;
- adjusting the positions of the centroids.

An experimental study was conducted on the optimal placement of base stations for the differential correction system in the global navigation satellite system. A visual analysis was performed of the results of base station placement using the improved method and known coverage methods. A comparative visual analysis reveals better coverage of the target area when using the same number of base stations. A quantitative analysis showed that using the improved method reduces the number of base stations by 21% compared to known methods. At the same time, the condition of full coverage of the specified area was met. This, in turn, has made it possible to reduce the complexity and cost of the global navigation satellite system's differential correction system.

The scope of application of the improved method is the placement of base stations for the global navigation satellite system's differential correction system.

**Keywords:** base station, global navigation satellite system, navigation corrections, optimal placement.

## References

1. Zheng, H., Atia, M., Yanikomeroglu, H. (2022). High Altitude Platform Station (HAPS)-Aided GNSS for Urban Areas. 2022 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE), 29–34. <https://doi.org/10.1109/wisee49342.2022.9926812>
2. Jiang, C., Zhou, X., Chen, H., Liu, T. (2026). UAV Positioning Using GNSS: A Review of the Current Status. *Drones*, 10 (2), 91. <https://doi.org/10.3390/drones10020091>
3. Sukhenko, A., Meirambekuly, N., Syzdykov, A., Mukhamedgali, A., Mellatova, Y. (2025). GNSS for High-Precision and Reliable Positioning: A Review of Correction Techniques and System Architectures. *Applied Sciences*, 15 (22), 12304. <https://doi.org/10.3390/app152212304>
4. Calatrava, H., Medina, D., Closas, P. (2025). Collaborative Code-Based Differential GNSS for Multi-User Positioning. 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 473–480. <https://doi.org/10.1109/plans61210.2025.11028501>
5. Spanghero, M., Papadimitratos, P. (2025). UnReference: analysis of the effect of spoofing on RTK reference stations for connected rovers. 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 316–327. <https://doi.org/10.1109/plans61210.2025.11028546>
6. Jin, Y., Yan, W., Zhu, J., Bastos, L. (2025). myGNSS: A real-time high-accuracy positioning app with android smartphones. *SoftwareX*, 31, 102326. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2025.102326>
7. Mi, X., Zhang, B., Yuan, Y. (2021). Multi-GNSS RTK positioning with integer ambiguity resolution: from double-differenced to single-differenced. *Journal of Global Positioning Systems*, 17 (2). <https://doi.org/10.5081/jgps.17.2.151>
8. Devi, S., Sangwan, A., Sangwan, A., Mohammed, M. A., Kumar, K., Nedoma, J. et al. (2022). The Use of Computational Geometry Techniques to Resolve the Issues of Coverage and Connectivity in Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 22 (18), 7009. <https://doi.org/10.3390/s22187009>
9. Li, G., Xu, M., Teng, G., Yang, W., Mak, S.-L., Li, C.-Y., Lee, C.-C. (2022). A Voronoi Diagram-Based Grouping Test Localization Scheme in Wireless Sensor Networks. *Electronics*, 11 (18), 2961. <https://doi.org/10.3390/electronics11182961>
10. Islam, M., Shareef, H., Mohamed, A. (2015). A Review of Techniques for Optimal Placement and Sizing of Electric Vehicle Charging Stations. *Przegląd elektrotechniczny*, 91, 122–126. <https://doi.org/10.15199/48.2015.08.29>
11. Atiz, Ö. F., Konukseven, C., Ögütçü, S., Alçay, S. (2022). Comparative analysis of the performance of Multi-GNSS RTK: A case study in Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7 (1), 67–80. <https://doi.org/10.26833/ijeg.878236>
12. Tang, M. (2015). A Memetic Algorithm for the Location-Based Continuously Operating Reference Stations Placement Problem in Network Real-Time Kinematic. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 45 (10), 2214–2223. <https://doi.org/10.1109/tycb.2014.2367499>
13. Liu, H., Li, W., Cai, H., Lin, Q., Li, X., Xiao, H. (2022). Research on Location Selection Model of 5G Micro Base Station Based on Smart Street Lighting System. *Mathematics*, 10 (15), 2627. <https://doi.org/10.3390/math10152627>
14. Anusuya, P., Vanitha, C., Cho, J., Easwaramoorthy, S. (2024). A comprehensive review of sensor node deployment strategies for maximized coverage and energy efficiency in wireless sensor networks. *PeerJ Computer Science*, 10, e2407. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2407>
15. Sapkota, B., Ghimire, R., Pujara, P., Ghimire, S., Shrestha, U., Ghimire, R. et al. (2024). 5G Network Deployment Planning Using Metaheuristic Approaches. *Telecom*, 5 (3), 588–608. <https://doi.org/10.3390/telecom5030030>

16. Li, Y.-Z., Chien, W.-C., Chao, H.-C., Cho, H.-H. (2021). Multi-objective Optimization Deployment Algorithm for 5G Ultra-Dense Networks. *Bio-Inspired Information and Communications Technologies*, 3–14. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92163-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92163-7_1)
17. Rahman, Md. S., Rimi, M. M. (2025). Optimal positioning of 5G base stations in different cellular networks: An adaptive moth flame optimization based approach. *Intelligent Decision Technologies*, 19 (5), 3021–3037. <https://doi.org/10.1177/18724981251357181>
18. Yang, J., Cao, L., Wang, J., Gao, Y., Liang, S. (2024). A Genetic Algorithm-Based Optimization of Multi-Station Cooperative Localization Deployment. *Proceedings of the 2024 7th International Conference on Artificial Intelligence and Pattern Recognition*, 998–1004. <https://doi.org/10.1145/3703935.3703970>
19. Ben Aissa, Y., Bouaziz, W., Mohammedi, A. (2022). Genetic Algorithm-based Optimal Wireless Sensor Network Deployment. *2022 International Symposium on INnovative Informatics of Biskra (ISNIB)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/isnib57382.2022.10075689>
20. Kumar, D., Gurjar, N. (2022). Determination of Optimal Site Location for Continuously Operated Reference Station (CORS) and it's validation with CORS Station Quality Index (CSQI) (11493). *FIG Congress 2022 Volunteering for the future - Geospatial excellence for a better living*, Warsaw. Available at: [https://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig2022/papers/ts08c/TS08C\\_kumar\\_gurjar\\_11493.pdf](https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2022/papers/ts08c/TS08C_kumar_gurjar_11493.pdf)
21. Abdallah, W., Mnasri, S., Val, T. (2022). Distributed Approach for the Indoor Deployment of Wireless Connected Objects by the Hybridization of the Voronoi Diagram and the Genetic Algorithm. *Journal of Engineering Research and Sciences*, 1 (2), 10–23. <https://doi.org/10.55708/js0102002>
22. Haipeng, L., Dazheng, F. (2023). Cuckoo search algorithm-based optimal deployment method of heterogeneous multistatic radar for barrier coverage. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 34 (5), 1101–1115. <https://doi.org/10.23919/jsee.2023.000064>
23. Cui, Y., He, H., Dong, W., Liu, L., Liu, H. (2022). The Opposition-Based Learning Parameter Adjusting Harmony Search Algorithm Research on Radars Optimal Deployment. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 1–30. <https://doi.org/10.1155/2022/7759968>
24. Dastgheib, M. A., Beyranvand, H., Salehi, J. A. (2026). Shannon Entropy for Load-Balanced Cellular Network Planning: Data-Driven Voronoi Optimization of Base-Station Locations. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 23, 2494–2506. <https://doi.org/10.1109/tnsm.2026.3663045>
25. Das, G. K., Das, S., Nandy, S. C., Sinha, B. P. (2006). Efficient algorithm for placing a given number of base stations to cover a convex region. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 66 (11), 1353–1358. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2006.05.004>
26. Grünbaum, B., Shephard, G. C. (1978). The ninety-one types of isogonal tilings in the plane. *Transactions of the American Mathematical Society*, 242, 335–353. <https://doi.org/10.1090/s0002-9947-1978-0496813-3>
27. de Berg, M., van Kreveld, M., Overmars, M., Schwarzkopf, O. (1997). *Computational Geometry*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03427-9>
28. Megiddo, N. (1983). Linear-Time Algorithms for Linear Programming in R3 and Related Problems. *SIAM Journal on Computing*, 12 (4), 759–776. <https://doi.org/10.1137/0212052>
29. Welzl, E. (1991). Smallest enclosing disks (balls and ellipsoids). *New Results and New Trends in Computer Science*, 359–370. <https://doi.org/10.1007/bfb0038202>
30. Ruban, I., Khudov, H., Makoveichuk, O., Khudov, V., Kalimulin, T., Glukhov, S. et al. (2022). Methods of UAVs images segmentation based on k-means and a genetic algorithm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (9 (118)), 30–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263387>
31. Khudov, H., Khudov, R., Khizhnyak, I., Hridasov, I., Hlushchenko, P. (2025). The small aerial objects segmentation method on optical-electronic images based on the sobel edge detector. *Advanced Information Systems*, 9 (2), 5–10. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.2.01>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.356119

**DEVELOPMENT OF COST-SENSITIVE ARTIFICIAL NEURAL NETWORK OPTIMIZATION IN SOLVING IMBALANCED MULTI-CLASS CLASSIFICATION PROBLEMS (p. 40–63)**

Bosker Sinaga

Universitas Putra Indonesia “YPTK”, Lubuk Begalung Nan XX,  
Kec. Lubuk Begalung, Kota Padang, Sumatera Barat, Indonesia  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9664-3307>

Yuhandri

Universitas Putra Indonesia “YPTK”, Lubuk Begalung Nan XX,  
Kec. Lubuk Begalung, Kota Padang, Sumatera Barat, Indonesia  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8576-5488>

Gunadi Widi Nurcahyo

Universitas Putra Indonesia “YPTK”, Lubuk Begalung Nan XX,  
Kec. Lubuk Begalung, Kota Padang, Sumatera Barat, Indonesia  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0714-0244>

The object of the study is the classification process of imbalanced multi-class data in air quality analysis based on the air pollution standard index (ISPU), which involves numerical environmental features and categorical output classes.

This study addresses the problem of imbalanced multi-class classification in air quality data based on the air pollution standard index (ISPU), where conventional classification techniques tend to be biased toward majority classes and fail to accurately identify minority classes. To overcome this limitation, a cost-sensitive learning strategy combined with adaptive error weighting, grid search with k-fold cross-validation, and principal component analysis (PCA) is applied. The dataset consists of 1,147 samples with an imbalanced distribution across three classes. The results demonstrate that the proposed method achieves an accuracy and F1-score of 98.55% and an area under the ROC curve (AUC) of 0.999, while significantly improving minority class sensitivity. This performance is explained by the cost-sensitive method that increases the penalty for minority class errors and by PCA, which enhances feature representation and learning stability. Compared to existing methods, the proposed method provides a more balanced and robust classification performance without modifying the original data distribution. This method can be effectively applied to ISPU-based air quality classification results and other imbalanced multi-class classification problems, although it requires careful parameter optimization for different data characteristics.

**Keywords:** cost-sensitive, artificial neural network, imbalanced classification, multi-class classification, PCA, machine learning.

## References

- Huang, W., Li, T., Liu, J., Xie, P., Du, S., Teng, F. (2021). An overview of air quality analysis by big data techniques: Monitoring, forecasting, and traceability. *Information Fusion*, 75, 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.03.010>
- Karmoude, M., Munhungewarwa, B., Chiraira, I., Mckenzie, R., Kong, J., Smith, B. et al. (2025). Machine learning for air quality prediction and data analysis: Review on recent advancements, challenges, and outlooks. *Science of the Total Environment*, 1002, 180593. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180593>

3. Ravindiran, G., Hayder, G., Kanagarathinam, K., Alagumalai, A., Sonne, C. (2023). Air quality prediction by machine learning models: A predictive study on the indian coastal city of Visakhapatnam. *Chemosphere*, 338, 139518. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139518>
4. Fahim, A., Osman, A. M., Tarek, Z., Elshewey, A. M. (2025). Enhancing Air Quality Index Classification Based on Ensemble Machine Learning Techniques. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15 (6), 29325–29333. <https://doi.org/10.48084/etasr.13875>
5. Labory, J., Njomgue-Fotso, E., Bottini, S. (2024). Benchmarking feature selection and feature extraction methods to improve the performances of machine-learning algorithms for patient classification using metabolomics biomedical data. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 23, 1274–1287. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2024.03.016>
6. Prael, F. J., Cox, J., Sturm, N., Kutchukian, P., Forrester, W. C., Michaud, G., Blank, J. et al. (2024). Machine learning proteochemometric models for Cereblon glue activity predictions. *Artificial Intelligence in the Life Sciences*, 6, 100100. <https://doi.org/10.1016/j.aailsci.2024.100100>
7. Buda, M., Maki, A., Mazurowski, M. A. (2018). A systematic study of the class imbalance problem in convolutional neural networks. *Neural Networks*, 106, 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.07.011>
8. Abdelsattar Mohamed Saeed, M., Rasslan, A., Emad-Eldeen, A. (2024). Comparative Analysis of Machine Learning Techniques for Fault Detection in Solar Panel Systems. *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, 5 (2), 140–152. <https://doi.org/10.21608/svusrc.2024.279389.1198>
9. Mienye, I. D., Sun, Y. (2021). Performance analysis of cost-sensitive learning methods with application to imbalanced medical data. *Informatics in Medicine Unlocked*, 25, 100690. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2021.100690>
10. Rezvani, S., Wang, X. (2023). A broad review on class imbalance learning techniques. *Applied Soft Computing*, 143, 110415. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110415>
11. Pes, B., Lai, G. (2021). Cost-sensitive learning strategies for high-dimensional and imbalanced data: a comparative study. *PeerJ Computer Science*, 7, e832. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.832>
12. Sangalli, S., Erdil, E., Hoetker, A., Donati, O., Konukoglu, E. (2021). Constrained Optimization to Train Neural Networks on Critical and Under-Represented Classes. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.12894>
13. Sleeman IV, W. C., Krawczyk, B. (2021). Multi-class imbalanced big data classification on Spark. *Knowledge-Based Systems*, 212, 106598. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.106598>
14. Zubair, M., Yoon, C. (2022). Cost-Sensitive Learning for Anomaly Detection in Imbalanced ECG Data Using Convolutional Neural Networks. *Sensors*, 22 (11), 4075. <https://doi.org/10.3390/s22114075>
15. Joloudari, J. H., Marefat, A., Nematollahi, M. A., Oyelere, S. S., Hussain, S. (2023). Effective Class-Imbalance Learning Based on SMOTE and Convolutional Neural Networks. *Applied Sciences*, 13 (6), 4006. <https://doi.org/10.3390/app13064006>
16. Safi, S. A.-D., Castillo, P. A., Faris, H. (2022). Cost-Sensitive Metaheuristic Optimization-Based Neural Network with Ensemble Learning for Financial Distress Prediction. *Applied Sciences*, 12 (14), 6918. <https://doi.org/10.3390/app12146918>
17. Prasetyowati, M. I., Maulidevi, N. U., Surendro, K. (2022). The accuracy of Random Forest performance can be improved by conducting a feature selection with a balancing strategy. *PeerJ Computer Science*, 8, e1041. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1041>
18. Nath, D., Shahariar, G. M. (2023). Gastrointestinal Disease Classification through Explainable and Cost-Sensitive Deep Neural Networks with Supervised Contrastive Learning. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.07603>
19. Mustari, A., Ahmed, R., Tasnim, A., Juthi, J. S., Shahariar, G. M. (2023). Explainable Contrastive and Cost-Sensitive Learning for Cervical Cancer Classification. 2023 26th International Conference on Computer and Information Technology (ICIT), 1–6. <https://doi.org/10.1109/iccit60459.2023.10441352>
20. Volk, O., Singer, G. (2024). An adaptive cost-sensitive learning approach in neural networks to minimize local training–test class distributions mismatch. *Intelligent Systems with Applications*, 21, 200316. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200316>
21. Kim, Y.-S., Kim, M. K., Fu, N., Liu, J., Wang, J., Srebric, J. (2025). Investigating the impact of data normalization methods on predicting electricity consumption in a building using different artificial neural network models. *Sustainable Cities and Society*, 118, 105570. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105570>
22. Manocchio, L. D., Layeghy, S., Gallagher, M., Portmann, M. (2025). An empirical evaluation of preprocessing methods for machine learning based network intrusion detection systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 158, 111289. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111289>
23. Bashir, R. N., Mzoughi, O., Shahid, M. A., Alturki, N., Saidani, O. (2024). “Principal Component Analysis (PCA) and feature importance-based dimension reduction for Reference Evapotranspiration (ET0) predictions of Taif, Saudi Arabia,” *Computers and Electronics in Agriculture*, 222, 109036. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109036>
24. Razali, M. N., Arbaiy, N., Lin, P.-C., Ismail, S. (2025). Optimizing Multiclass Classification Using Convolutional Neural Networks with Class Weights and Early Stopping for Imbalanced Datasets. *Electronics*, 14 (4), 705. <https://doi.org/10.3390/electronics14040705>
25. Wang, Y., Rosli, M. M., Musa, N., Li, F. (2024). Multi-Class Imbalanced Data Classification: A Systematic Mapping Study. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14 (3), 14183–14190. <https://doi.org/10.48084/etasr.7206>
26. Shoeibi, M., Nevisi, M. M. S., Salehi, R., Martin, D., Halimi, Z., Baniyasi, S. (2024). Enhancing Hyper-Spectral Image Classification with Reinforcement Learning and Advanced Multi-Objective Binary Grey Wolf Optimization. *Computers, Materials & Continua*, 79 (3), 3469–3493. <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.049847>
27. Guo, Q., Wang, C., Xiao, D., Huang, Q. (2023). A novel multi-label pest image classifier using the modified Swin Transformer and soft binary cross entropy loss. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 107060. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107060>
28. Zhao, Y. (2020). A note on new Bernstein-type inequalities for the log-likelihood function of Bernoulli variables. *Statistics & Probability Letters*, 163, 108779. <https://doi.org/10.1016/j.spl.2020.108779>
29. Narendran, A., Inuguri, A. H., Ravindra, A. R., Saga, H., C. S., V., Raj, R., B., K. (2025). Computational Approaches for Classifying Antimicrobial Peptides: A Comparative Analysis of BERT, Word2Vec, One-Hot Encoding, and Physicochemical Analysis. *Procedia Computer Science*, 258, 3019–3030. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.04.560>
30. Yeung, M., Sala, E., Schönlieb, C.-B., Rundo, L. (2022). Unified Focal loss: Generalising Dice and cross entropy-based losses to handle class imbalanced medical image segmentation. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 95, 102026. <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2021.102026>
31. Song, Z., Shi, Z., Yan, X., Zhang, B., Song, S., Tang, C. (2024). An Improved Weighted Cross-Entropy-Based Convolutional Neural Network for Auxiliary Diagnosis of Pneumonia. *Electronics*, 13 (15), 2929. <https://doi.org/10.3390/electronics13152929>
32. Han, X., Zhu, X., Pedrycz, W., Mostafa, A. M., Li, Z. (2024). A design of fuzzy rule-based classifier optimized through softmax function and

- information entropy. *Applied Soft Computing*, 156, 111498. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111498>
33. Sun, Y., Zheng, J., Zhao, H., Zhou, H., Li, J., Li, F. et al. (2024). Modifying the one-hot encoding technique can enhance the adversarial robustness of the visual model for symbol recognition. *Expert Systems with Applications*, 250, 123751. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123751>
  34. Polat, G., Çağlar, Ü. M., Temizel, A. (2025). Class distance weighted cross entropy loss for classification of disease severity. *Expert Systems with Applications*, 269, 126372. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.126372>
  35. He, H., Garcia, E. A. (2009). Learning from Imbalanced Data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 21 (9), 1263–1284. <https://doi.org/10.1109/tkde.2008.239>
  36. Ling, C. X., Sheng, V. S. (2008). Cost-Sensitive Learning and the Class Imbalance Problem. *Encyclopedia of Machine Learning*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/268201268\\_Cost-Sensitive\\_Learning\\_and\\_the\\_Class\\_Imbalance\\_Problem](https://www.researchgate.net/publication/268201268_Cost-Sensitive_Learning_and_the_Class_Imbalance_Problem)
  37. Johnson, J. M., Khoshgoftaar, T. M. (2019). Survey on deep learning with class imbalance. *Journal of Big Data*, 6 (1). <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0192-5>
  38. Cui, Y., Jia, M., Lin, T.-Y., Song, Y., Belongie, S. (2019). Class-Balanced Loss Based on Effective Number of Samples. 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 9260–9269. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2019.00949>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.356915

**CONSTRUCTION OF A DIGITAL TWIN MODEL FOR A SYSTEM THAT MONITORS THE TECHNICAL CONDITION OF A NUCLEAR POWER PLANT POWER UNIT (p. 64–71)**

**Viktoriia Prokhorova**

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2552-2131>

**Mykola Budanov**

Provisioning Authority, Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8032-0562>

**Kostiantyn Brovko**

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9669-9316>

**Pavlo Budanov**

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1542-9390>

**Vyacheslav Melnikov**

LLC Equator Sun Energy, Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6427-6805>

**Ihor Kyrsov**

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0214-8880>

**Oleh Velykohorskyi**

LLC FIRM «SAMSHYT-2», Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6102-0659>

**Andrii Nosyk**

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,  
Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4171-1875>

**Oleh Karpenko**

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4009-1990>

This study investigates the process of continuous monitoring and control of the technological process parameters at a nuclear power plant power unit using a digital twin model implemented on the basis of a system-cluster approach.

The task addressed relates to the lack of a comprehensive, integrated system for continuous monitoring of the technical condition of the power unit, capable of collecting, processing, and analyzing information from sensors and diagnostic subsystems in real time.

It is proposed to model the state of the technological equipment at a power unit using a digital twin and a system-cluster approach. Within the framework of the study, a system-cluster architecture of a digital twin was designed, which reflects the interaction among the physical, analytical, and control levels of the power unit at a nuclear power plant.

The work involved processing the technological process parameters coming from a sensor network with a frequency of 1–2 Hz, with a processing delay of no more than 1–3 s. The proposed information-fractal criterion provided an increase in the sensitivity of pre-accident detection by 15–25% compared to conventional methods, as well as made it possible to identify complex operating modes in the range of  $D_f^{mon} = 0.45 - 0.8$ .

The results have made it possible to solve the set tasks by integrating multi-scale fractal analysis, cluster organization of technical systems, and self-similarity modeling. The practical implementation of the digital twin has proven its capability to detect changes in the structure of the technological process with diagnostic accuracy at the level of 85–92%.

The implementation of the digital twin model in the information-control systems of the power unit makes it possible to increase the reliability, safety, and efficiency of control.

**Keywords:** continuous monitoring system, system-cluster approach, fractal analysis, digital twin model.

**References**

1. van Dinter, R., Tekinerdogan, B., Catal, C. (2022). Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 151, 107008. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008>
2. Song, H., Song, M., Liu, X. (2022). Online autonomous calibration of digital twins using machine learning with application to nuclear power plants. *Applied Energy*, 326, 119995. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119995>
3. Kochunas, B., Huan, X. (2021). Digital Twin Concepts with Uncertainty for Nuclear Power Applications. *Energies*, 14 (14), 4235. <https://doi.org/10.3390/en14144235>
4. Xu, Q., Zhou, G., Zhang, C., Chang, F., Huang, Q., Zhang, M., Zhi, Y. (2025). A Digital Twin Framework for Nuclear Power Equipment Maintenance: Design, Prototyping, and Preliminary Validation. *Digital Twin*, 2 (1). <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17695.2>
5. Lin, L., Bao, H., Dinh, N. (2021). Uncertainty quantification and software risk analysis for digital twins in the nearly autonomous management and control systems: A review. *Annals of Nuclear Energy*, 160, 108362. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108362>
6. Budanov, P., Brovko, K., Cherniuk, A., Vasyuchenko, P., Khomenko, V. (2018). Improving the reliability of information control systems at power generation facilities based on the fractal cluster theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (92)), 4–12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126427>
7. Karnik, N., Abdo, M. G., Estrada-Perez, C. E., Yoo, J. S., Cogliati, J. J., Skifton, R. S. et al. (2024). Constrained Optimization of Sensor Placement for Nuclear Digital Twins. *IEEE Sensors Journal*, 24 (9), 15501–15516. <https://doi.org/10.1109/jsen.2024.3368875>
8. Daniell, J., Kobayashi, K., Alajo, A., Alam, S. B. (2025). Digital twin-centered hybrid data-driven multi-stage deep learning framework

- for enhanced nuclear reactor power prediction. *Energy and AI*, 19, 100450. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100450>
9. Budanov, P., Brovko, K., Melnikov, V., Yakymchuk, M., Kononov, V., Kyrsov, I. et al. (2025). Construction of an information model of the digital twin of the technological process in a power unit at a nuclear power plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (8 (136)), 39–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335712>
  10. Nguyen, T. N., Ponciroli, R., Bruck, P., Esselman, T. C., Rigatti, J. A., Vilim, R. B. (2022). A digital twin approach to system-level fault detection and diagnosis for improved equipment health monitoring. *Annals of Nuclear Energy*, 170, 109002. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109002>
  11. Chen, F., Huang, Q., Song, M., Liu, X., Zeng, W., Song, H., Cheng, K. (2025). A study on the development of digital model of digital twin in nuclear power plant based on a hybrid physics and data-driven approach. *Applied Thermal Engineering*, 271, 126289. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126289>
  12. Qi, F., Li, W., Liu, Z., Li, Q., Li, Y., Huang, Y. et al. (2022). Gradient percolation of fission gases in nuclear fuel pellet. *Journal of Nuclear Materials*, 571, 153993. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153993>
  13. Chen, M., Liu, H., Zhao, W., Zhang, Y., Yu, W., Peng, Q. et al. (2025). Development of the environmental assisted fatigue assessment method for nuclear plants in digital twin. *Nuclear Engineering and Technology*, 57 (6), 103402. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.103402>
  14. Budanov, P., Khomiak, E., Kyrsov, I., Brovko, K., Kalnoy, S., Karpenko, O. (2022). Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (8 (118)), 60–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263374>
  15. Songbo, R., Chao, K., Ying, G., Song, G., Shenghui, Z., Gang, L. et al. (2022). Measurement pitting morphology characteristic of corroded steel surface and fractal reconstruction model. *Measurement*, 190, 110678. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110678>
  16. Budanov, P., Kyrsov, I., Oliinyk, Y., Brovko, K., Zhukov, S. (2025). Fractal Approach for Researching Information Emergency Features of Technological Parameters. *International Journal of Computing*, 24 (1), 171–177. <https://doi.org/10.47839/ijc.24.1.3889>
  17. Budanov, P., Oliinyk, Y., Cherniuk, A., Brovko, K. (2024). Dynamic Fractal Cluster Model of Informational Space Technological Process of Power Station. *Information Technology for Education, Science, and Technics*, 141–155. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_11)
  18. Ferriol-Galmés, M., Suárez-Varela, J., Paillissé, J., Shi, X., Xiao, S., Cheng, X. et al. (2022). Building a Digital Twin for network optimization using Graph Neural Networks. *Computer Networks*, 217, 109329. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109329>
  19. Husain, A., Nanda, M. N., Chowdary, M. S., Sajid, M. (2022). Fractals: An Eclectic Survey, Part-I. *Fractal and Fractional*, 6 (2), 89. <https://doi.org/10.3390/fractalfract6020089>
  20. Tian, K., Gao, T., Hu, X., Xiao, J., Liu, Y. (2024). Novel optimal sensor placement method towards the high-precision digital twin for complex curved structures. *International Journal of Solids and Structures*, 302, 113003. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.113003>
  21. Budanov, P., Kyrsov, I., Brovko, K., Rudenko, D., Vasiuchenko, P., Nosyk, A. (2021). Development of a solar element model using the method of fractal geometry theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (8 (111)), 75–89. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235882>
  22. Budanov, P., Oliinyk, Y., Cherniuk, A., Brovko, K. (2024). Fractal approach for the researching of information emergency features of technological parameters. *TRANSPORT, ECOLOGY, SUSTAINABLE DEVELOPMENT: EKO VARNA* 2023, 3104, 040015. <https://doi.org/10.1063/5.0191648>
  23. Stewart, R., Treviño, E., Shields, A., Heaps, K., Darrington, J., Williams, Q. et al. (2025). The AGN-201 Digital Twin: A test bed for remotely monitoring nuclear reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 213, 111041. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.111041>
  24. Prokhorova, V., Budanov, O., Budanov, P., Slastianykova, K. (2025). Devising a methodology for estimating the information potential of energy enterprises under the conditions of digital coherency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (13 (135)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.332324>
  25. Prokhorova, V., Budanov, O., Budanov, M., Slastianykova, K. (2025). Building a consolidated model of digital coherence for managing the information potential at power enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (13 (136)), 58–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.336641>
- 
- DOI: 10.15587/1729-4061.2026.358310**  
**DEVELOPMENT OF A HYBRID ONBOARD DIAGNOSTIC ARCHITECTURE WITH LIGHTWEIGHT MACHINE LEARNING FOR RESOURCE-CONSTRAINED CUBESAT SYSTEMS (p. 72–85)**
- Ainur Kuttybayeva**  
 Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
 Institute of Mechanics and Machine Science named after Academician U. A. Dzholdasbekov, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7281-3690>
- Samal Zhamalova**  
 Astana International University, Astana, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-7310-9398>
- Anargul Boranbayeva**  
 Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
 Institute of Mechanics and Machine Science named after Academician U. A. Dzholdasbekov, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2221-9604>
- Zhansaya Myrzayeva**  
 Astana International University, Astana, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-7375-7985>
- Gulnar Imasheva**  
 Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3604-3320>
- Zhanat Kaskatayev**  
 Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-9519-8885>
- Yersain Chinibayev**  
 Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-8985-5892>
- Nurzhamal Ospanova**  
 International IT University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1170-4794>
- Mukhit Abdullayev**  
 Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-3349-1881>
- Kalmukhamed Tazhen**  
 Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-5890-5328>
- The object of the study is the onboard diagnostic process in CubeSat nanosatellite systems, with particular emphasis on fault detection

based on real-time analysis of multivariate telemetry data under real-time embedded operating conditions. The problem statement is the gap between the relatively low computational expenses and predictability of classical FDIR approaches and their limited ability to detect complex anomalies, and, conversely, the greater anomaly sensitivity and lower embedded performance of machine-learning models. A hybrid onboard diagnostic architecture that integrates telemetry acquisition, telemetry preprocessing, statistical feature extraction, a deterministic FDIR branch, a lightweight machine-learning branch, and decision fusion into one onboard diagnostics session has been elaborated. The proposed hybrid onboard diagnostic architecture has been evaluated based on hardware-in-the-loop testing using representative telemetry and fault cases for CubeSat systems. The evaluation metrics were the fault-detection accuracy, the detection latency, the CPU consumption, the memory consumption, and the resistance to telemetry noise. The hybrid onboard diagnostic architecture was compared to the conventional threshold-based FDIR system and standalone machine learning algorithms under the same HIL conditions. In the reported experiment setup, the proposed hybrid onboard diagnostic architecture demonstrated the fault-detection accuracy of 94%, while the classical FDIR method provided 71%, and the standalone machine-learning approach provided 88%. The average detection latency was decreased to 83 ms, in contrast to 120 ms and 95 ms, respectively. The embedded solution requires only 17.6% CPU and 58 KB of memory. Under the highest telemetry-noise level, the fault-detection accuracy of the proposed hybrid onboard diagnostic architecture decreases to 80%, whereas the standalone machine-learning and the classical FDIR baselines provide only 65% and 43% fault-detection accuracy, respectively.

**Keywords:** CubeSat onboard diagnostics, fault detection, hybrid FDIR, lightweight machine learning.

## References

- Isermann, R. (2006). *Fault-Diagnosis Systems*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-30368-5>
- Patton, R. J., Frank, P. M., Clark, R. N. (Eds.) (2000). *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3644-6>
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Kavuri, S. N., Yin, K. (2003). A review of process fault detection and diagnosis. *Computers & Chemical Engineering*, 27 (3), 327–346. [https://doi.org/10.1016/s0098-1354\(02\)00162-x](https://doi.org/10.1016/s0098-1354(02)00162-x)
- Oche, P. A., Ewa, G. A., Ibekwe, N. (2024). Applications and Challenges of Artificial Intelligence in Space Missions. *IEEE Access*, 12, 44481–44509. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3132500>
- Cratere, A., Gagliardi, L., Sanca, G. A., Golmar, F., Dell’Olio, F. (2024). On-Board Computer for CubeSats: State-of-the-Art and Future Trends. *IEEE Access*, 12, 99537–99569. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3428388>
- Obied, M. A., Ghaleb, F. F. M., Hassanien, A. E., Abdelfattah, A. M. H., Zakaria, W. (2023). Deep Clustering-Based Anomaly Detection and Health Monitoring for Satellite Telemetry. *Big Data and Cognitive Computing*, 7 (1), 39. <https://doi.org/10.3390/bdcc7010039>
- Li, Z., Zhang, Y., Ai, J., Zhao, Y., Yu, Y., Dong, Y. (2023). A Lightweight and Explainable Data-Driven Scheme for Fault Detection of Aerospace Sensors. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 59 (6), 8392–8410. <https://doi.org/10.1109/taes.2023.3303855>
- Fejari, A., Delavault, A., Camilleri, R., Valentino, G. (2025). A Review of Anomaly Detection in Spacecraft Telemetry Data. *Applied Sciences*, 15 (10), 5653. <https://doi.org/10.3390/app15105653>
- Xu, Z., Cheng, Z., Guo, B. (2023). A hybrid data-driven framework for satellite telemetry data anomaly detection. *Acta Astronautica*, 205, 281–294. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.02.009>
- Nalepa, J., Myller, M., Andrzejewski, J., Benecki, P., Piechaczek, S., Kostrzewa, D. (2022). Evaluating algorithms for anomaly detection in satellite telemetry data. *Acta Astronautica*, 198, 689–701. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.06.026>
- Shon, T., Moon, J. (2007). A hybrid machine learning approach to network anomaly detection. *Information Sciences*, 177 (18), 3799–3821. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2007.03.025>
- Hodge, V., Austin, J. (2004). A Survey of Outlier Detection Methodologies. *Artificial Intelligence Review*, 22 (2), 85–126. <https://doi.org/10.1023/b:aire.0000045502.10941.a9>
- He, J., Cheng, Z., Guo, B. (2024). Anomaly detection in telemetry data using a jointly optimal one-class support vector machine with dictionary learning. *Reliability Engineering & System Safety*, 242, 109717. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109717>
- Hedayati, M., Rahimi, A. (2025). A hybrid framework for real-time satellite fault diagnosis using Markov jump-adjusted models and 1D sliding window Residual Networks. *Acta Astronautica*, 228, 1066–1087. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.12.057>
- Crotti, E., Colagrossi, A. (2025). Machine Learning Approaches for Data-Driven Self-Diagnosis and Fault Detection in Spacecraft Systems. *Applied Sciences*, 15 (14), 7761. <https://doi.org/10.3390/app15147761>
- Lai, Y., Zhu, Y., Li, L., Lan, Q., Zuo, Y. (2025). STGLR: A Spacecraft Anomaly Detection Method Based on Spatio-Temporal Graph Learning. *Sensors*, 25 (2), 310. <https://doi.org/10.3390/s25020310>
- Liang, H., Liu, C., Liu, W., Li, W., Zhang, Y. (2025). Spacecraft Health Status Monitoring Method Based on Multidimensional Data Fusion. *Machines*, 13 (12), 1136. <https://doi.org/10.3390/machines13121136>
- Liu, M., Xia, Q., Qiu, S. (2024). A new data-driven framework for progressive anomaly event alerts in spacecraft based on reconstruction discrepancy. *Advances in Space Research*, 74 (11), 5890–5905. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.08.054>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.356495

### РОЗРОБКА КРИПТО-КODOВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ГІПЕРЕЛІПТИЧНИХ КРИВИХ (с. 6–18)

О. Б. Ахієзер, О. С. Кушнерьов, Г. В. Неласа, О. Г. Король, К. С. Ямковий, О. В. Войтко, В. Є. Сокол, О. Б. Волощук, О. М. Новоселецький, О. В. Неласий

Об'єкт дослідження становлять алгебраїчні процеси формування, кодування та синдромного декодування даних у крипто-кодівих конструкціях на базі гіпереліптичних кривих вищих родів над полями Галуа. Проблема, що вирішувалася, полягає у надмірній обчислювальній складності та енергоємності постквантових асиметричних криптосистем, що унеможливує їх використання на апаратних платформах із ресурсними обмеженнями. Отримані результати охоплюють побудову математичної моделі алгебро-геометричного коду у проєктивних координатах, розробку алгоритму картування точок, генерацію розріджених матриць. Імплементация гіпереліптичних структур у симетричну схему Рао-Нама дозволила скоротити енергозатрати на 20–60% порівняно з асиметричною схемою Мак-Еліса. Зростання загальної ефективності системи пояснюється цілковитою ліквідацією ресурсоємної операції інверсії елементів поля Галуа завдяки ізоморфному переходу до проєктивного простору, а також повною відмовою від розв'язування матричних рівнянь під час процесу розшифрування криптограм. Особливості та відмінні риси отриманих результатів, завдяки яким вони дозволили вирішити досліджувану проблему, полягають у тому, що цілеспрямована селекція вектор-рядків для матриць оцінювання дозволила штучно мінімізувати вагу Геммінга коду. При цьому синергія багатовимірної алгебраїчної геометрії із симетричною архітектурою забезпечила наближення до лінійної часової складності декодування. Сфера та умови практичного використання отриманих результатів охоплюють застосування синтезованих крипто-кодівих конструкцій у вузлах сучасних кіберфізичних систем та мережах Інтернету речей (ІоТ) за умов жорсткого дефіциту обчислювальних ресурсів і лімітів автономного живлення.

**Ключові слова:** постквантова криптографія, гіпереліптична крива, крипто-кодівих конструкція, схема Рао-Нама, алгебро-геометричний код.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.355853

### РОЗРОБКА МЕТОДУ ДИНАМІЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ КОНСЕНСУСУ НА ОСНОВІ АДАПТИВНОГО ЗМІШУВАННЯ ВАГИ ТА ЧАСОВОГО ФАКТОРА (с. 19–28)

І. Р. Соломка, Б. Б. Любінський

Об'єктом дослідження є процес формування комітету валідаторів у відкритих блокчейн-мережах на основі Proof-of-Stake. Проблема, котра вирішувалася, полягає у вразливості традиційних статичних схем відбору до атаки шляхом підробки ідентичності. Фіксована базова вага сприяє розподілу стейку між численними фіктивними сутностями, що дозволяє зловмисникам отримати контроль над мережею. У відповідь на ці виклики було розроблено метод динамічної стабілізації консенсусу, який ґрунтується на адаптивному законі керування. Метод автоматично регулює інтенсивність змішування ваг за допомогою згладженого коефіцієнта Джині. Запропоновано концепцію Proof-of-Persistence, що замінює рівномірний базовий розподіл на часово-зважену репутацію учасників. Проведено аналітичний та експериментальний аналіз даних 10 реальних мереж, який засвідчив, що запропонований механізм надійно знижує загальну вагу потенційного зловмисника. Отриманий результат пояснюється тим, що при створенні нових сутностей їхній попередній досвід участі не враховується, а втрата репутаційної ваги переважає вигоди від отримання нових базових часток. Це робить стратегію розщеплення стейку економічно не вигідною. Важливо, що адаптація системи здійснюється виключно на основі детермінованих даних, отриманих із блокчейна, без необхідності зовнішньої ідентифікації. Запропонована система функціонує автономно і у звичайному режимі втручання мінімізується, а за умов ризику олігополії захист посилюється. Практичне застосування результатів стосується архітектури permissionless блокчейн-мереж, оскільки метод може бути інтегрований як на рівні ядра протоколу мережі, так і у вигляді смарт-контрактів для підвищення безпеки розподілених реєстрів без додаткових ручних налаштувань.

**Ключові слова:** Proof-of-Stake, Sybil-стійкість, адаптивний консенсус, відбір комітету, коефіцієнт Джині, Proof-of-Persistence.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.357607

### УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ СИСТЕМИ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ КОРЕКЦІЇ ГЛОБАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ (с. 29–39)

Г. В. Худов, І. А. Таран, С. В. Логачов, К. К. Кулагін, О. І. Рибачук

Об'єктом дослідження є процес розміщення базових станцій системи диференціальної корекції глобальної навігаційної супутникової системи. Вирішується проблема зменшення складності системи диференціальної корекції за рахунок оптимізації кількості та розміщення базових станцій системи глобальної навігаційної супутникової системи.

Удосконалено метод раціонального розміщення базових станцій системи диференціальної корекції глобальної навігаційної супутникової системи, який, на відміну від відомих, передбачає:

- початкове заомощення заданого району точками-полосою діаграми Вороного;
- побудову діаграми Вороного;

- знаходження центроїд отриманих комірок як положень центрів найменших охоплюючих кіл комірок Вороного;
- перевірку виконання умови зміни положень центроїд;
- перевірку виконання умови знаходження центроїд в межах заборонених зон;
- коригування положення центроїд.

Проведено експериментальне дослідження щодо раціонального розміщення базових станцій системи диференціальної корекції глобальної навігаційної супутникової системи. Проведено візуальний аналіз результатів розміщення базових станцій удосконаленим методом та відомими методами заомощення. Порівняльний візуальний аналіз свідчить про краще заповнення заданого району при використанні однакової кількості базових станцій. Кількісний аналіз показав, що використання удосконаленого методу дозволяє зменшити кількість базових станцій на 21% у порівнянні з відомими методами. При цьому виконано умова повного перекриття заданого району. Це, в свою чергу, дозволило зменшити складність і вартість системи диференціальної корекції глобальної навігаційної супутникової системи.

Сфера застосування удосконаленого методу – розташування базових станцій системи диференціальної корекції глобальної навігаційної супутникової системи.

**Ключові слова:** базова станція, глобальна навігаційна супутникова система, навігаційні поправки, раціональне розміщення.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.356119

### РОЗРОБКА ЕКОНОМІЧНО ЧУТЛИВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ НЕЗБАЛАНСОВАНИХ ЗАДАЧ БАГАТОКЛАСОВОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ (с. 40–63)

Bosker Sinaga, Yuhandri, Gunadi Widi Nurcahyo

Об'єктом дослідження є процес класифікації незбалансованих багатокласових даних в аналізі якості повітря на основі стандартного індексу забруднення повітря (ISPU), який включає числові екологічні характеристики та категоріальні вихідні класи.

Це дослідження розглядає проблему незбалансованої багатокласової класифікації даних про якість повітря на основі стандартного індексу забруднення повітря (ISPU), де традиційні методи класифікації, як правило, зміщені в бік класів більшості та не дозволяють точно визначити класи меншин. Щоб подолати це обмеження, застосовується економічно чутлива стратегія навчання, поєднана з адаптивним зважуванням помилок, пошуком по сітці з k-кратною перехресною перевіркою та аналізом головних компонентів (PCA). Набір даних складається з 1147 зразків з незбалансованим розподілом за трьома класами. Результати показують, що запропонований метод досягає точності та F1-оцінки 98,55% та площі під ROC-кривою (AUC) 0,999, водночас значно покращуючи чутливість класів меншин. Ця продуктивність пояснюється економічно чутливим методом, який збільшує штраф за помилки класів меншин, та PCA, який покращує представлення ознак та стабільність навчання. Порівняно з існуючими методами, запропонований метод забезпечує більш збалансовану та надійну класифікацію без зміни розподілу вихідних даних. Цей метод може бути ефективно застосований до результатів класифікації якості повітря на основі ISPU та інших незбалансованих задач багатокласової класифікації, хоча він вимагає ретельної оптимізації параметрів для різних характеристик даних.

**Ключові слова:** економічно чутливий, штучна нейронна мережа, незбалансована класифікація, багатокласова класифікація, PCA, машинне навчання.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.356915

### РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ДЛЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕНЕРГОБЛОКУ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ (с. 64–71)

В. В. Прохорова, М. П. Буданов, К. Ю. Бровко, П. Ф. Буданов, В. Є. Мельников, І. Г. Кирисов, О. В. Великогорський, А. М. Носик, О. В. Карпенко

Об'єктом дослідження є процес безперервного моніторингу та контролю параметрів технологічного процесу енергоблоку атомної електростанції з використанням моделі цифрового двійника, реалізованої на основі системно-кластерного підходу.

Проблема полягає у відсутності комплексної, інтегрованої системи безперервного моніторингу технічного стану енергоблоку, здатної у режимі реального часу здійснювати збір, обробку та аналіз інформації від датчиків і діагностичних підсистем.

Запропоновано моделювання стану технологічного обладнання енергоблоку проводити засобами цифрового двійника та системно-кластерного підходу. У межах дослідження сформовано системно-кластерну архітектуру цифрового двійника, яка відображає взаємодію фізичних, аналітичних і керуючих рівнів енергоблоку атомної електростанції.

У роботі проводилась обробка параметрів технологічного процесу, що надходять із мережі датчиків із частотою 1–2 Гц, із затримкою обробки не більше 1–3 с. Запропонований інформаційно-фрактальний критерій забезпечив підвищення чутливості виявлення передаварійних станів на 15–25% порівняно з традиційними методами, а також дозволив ідентифікувати складні режими функціонування у діапазоні  $D_f^{min} = 0.45 - 0.8$ .

Отримані результати дозволили вирішити поставлені завдання шляхом інтеграції багатомасштабного фрактального аналізу, кластерної організації технічних систем та моделювання самоподібності. Практична реалізація цифрового двійника довела його здатність виявляти зміни у структурі технологічного процесу з точністю діагностики на рівні 85–92%.

Впровадження моделі цифрового двійника в інформаційно-керуючі системи енергоблоку дозволяє підвищити надійність, безпеку та оперативність управління.

**Ключові слова:** система безперервного моніторингу, системно-кластерний підхід, фрактальний аналіз, модель цифрового двійника.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2026.358310****РОЗРОБКА ГІБРИДНОЇ БОРТОВОЇ ДІАГНОСТИЧНОЇ АРХІТЕКТУРИ З ЛЕГКИМ МАШИННИМ НАВЧАННЯМ ДЛЯ СИСТЕМ CUBESAT З ОБМЕЖЕНИМИ РЕСУРСАМИ (с. 72–85)****Ainur Kuttybayeva, Samal Zhamalova, Anargul Boranbayeva, Zhansaya Myrzayeva, Gulnar Imasheva, Zhanat Kaskatayev, Yersain Chinibayev, Nurzhamal Ospanova, Mukhit Abdullayev, Kalmukhamed Tazhen**

Об'єктом дослідження є процес бортової діагностики в наносупутникових системах CubeSat, з особливим акцентом на виявленні несправностей на основі аналізу багатовимірних телеметричних даних у реальному часі в умовах вбудованої роботи в реальному часі. Постановка проблеми полягає у розриві між відносно низькими обчислювальними витратами та передбачуваністю класичних підходів FDIR та їх обмеженою здатністю виявляти складні аномалії, і, навпаки, більшою чутливістю до аномалій та нижчою продуктивністю вбудованих моделей машинного навчання. Розроблено гібридну архітектуру бортової діагностики, яка інтегрує збір телеметричних даних, попередню обробку телеметричних даних, статистичне вилучення ознак, детерміновану гілку FDIR, полегшену гілку машинного навчання та об'єднання рішень в один сеанс бортової діагностики. Запропонована гібридна архітектура бортової діагностики була оцінена на основі апаратного тестування в циклі з використанням репрезентативних випадків телеметрії та несправностей для систем CubeSat. Метриками оцінки були точність виявлення несправностей, затримка виявлення, споживання процесора, споживання пам'яті та стійкість до телеметричного шуму. Гібридну архітектуру бортової діагностики порівнювали зі звичайною системою FDIR на основі порогів та автономними алгоритмами машинного навчання за тих самих умов НПЛ. У запропонованій експериментальній установці запропонована гібридна архітектура бортової діагностики продемонструвала точність виявлення несправностей 94%, тоді як класичний метод FDIR забезпечив 71%, а автономний підхід машинного навчання – 88%. Середня затримка виявлення зменшилася до 83 мс, порівняно зі 120 мс та 95 мс відповідно. Вбудоване рішення вимагає лише 17,6% ресурсів процесора та 58 КБ пам'яті. За найвищого рівня телеметричного шуму точність виявлення несправностей запропонованої гібридної архітектури бортової діагностики знижується до 80%, тоді як автономне машинне навчання та класична базові лінії FDIR забезпечують лише 65% та 43% точності виявлення несправностей відповідно.

**Ключові слова:** бортова діагностика CubeSat, виявлення несправностей, гібридний FDIR, легке машинне навчання.