

ABSTRACT AND REFERENCES

MATHEMATICS AND CYBERNETICS – APPLIED ASPECTS

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.332468

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF DIGITAL MARKETING FOR ENTERPRISES IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX BASED ON NSGA-III ALGORITHM AND MACHINE LEARNING (p. 6–17)**Olena Kryvoruchko**National University of Life and
Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7661-9227>**Zhansaya Abildaeva**Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2637-0443>**Valerii Lakhno**National University of Life and
Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9695-4543>**Mykola Tsiutsiura**State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4713-7568>**Svitlana Tsiutsiura**State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4270-7405>**Anna Kharchenko**National Transport University, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8166-6389>**Mykola Kolbasin**V. M. Glushkov Institute of Cybernetics
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0563-0565>

The object of this study is the process of optimizing digital marketing for agro-industrial enterprises under conditions of multi-criteria and uncertainty. A formal statement of the problem of optimizing marketing strategies for agricultural production has been given by using the genetic algorithm NSGA-III. A hybrid method was devised to solve the task of multi-criteria optimization of marketing strategies for agro-industrial enterprises. The method is based on the NSGA-III algorithm in combination with the XGBoost software library and adapted to industry constraints for marketing strategies in the agricultural markets of Ukraine and Kazakhstan Republic. This allows for the generation and interpretation of Pareto-optimal strategies taking into account such criteria as efficiency, coverage, return on investment (ROI), costs, and engagement.

A cluster analysis of solutions has been performed; three characteristic scenarios were identified – balanced, cautious, and aggressive. Empirical validation by regression analysis demonstrated the high accuracy of the model, as well as its ability to extrapolate new solutions. In particular, the mean square error on the test sample was 0.0316 with the achieved coefficient of determination of 0.9041. The results confirm the effectiveness of the devised method to support decision-making under conditions of multi-criteria and limited resources.

The proposed method was used as the basis for the development of software implemented in practice at enterprises of the agro-industrial complex. However, the scope of method application also includes the activities by other business entities that devise marketing strategies to achieve the efficiency of their activities.

Keywords: hybrid method, digital marketing, multi-criteria optimization, NSGA-III algorithm, cluster analysis.

References

1. Juswadi, J., Sumarna, P., Mulyati, N. S. (2020). Digital Marketing Strategy of Indonesian Agricultural Products. Proceedings of the International Conference on Agriculture, Social Sciences, Education, Technology and Health (ICASSETH 2019). <https://doi.org/10.2991/assehr.k.200402.024>
2. Valenzuela-Hurtado, Y., Meneses-Claudio, B., Carmen-Choquehuanca, E. (2023). Elements of digital marketing and the positioning of the company INNOVA BIOTECH AGRO SAC. Salud, Ciencia y Tecnología – Serie de Conferencias, 2, 373. <https://doi.org/10.56294/setconf2023373>
3. Jadhav, G. G., Gaikwad, S. V., Bapat, D. (2023). A systematic literature review: digital marketing and its impact on SMEs. Journal of Indian Business Research, 15 (1), 76–91. <https://doi.org/10.1108/jibr-05-2022-0129>
4. Saura, J. R., Ribeiro-Soriano, D., Palacios-Marqués, D. (2021). Setting B2B digital marketing in artificial intelligence-based CRMs: A review and directions for future research. Industrial Marketing Management, 98, 161–178. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2021.08.006>
5. Lima, G. C., Figueiredo, F. L., Barbieri, A. E., Seki, J. (2020). Agro 4.0: Enabling agriculture digital transformation through IoT. REVIS-TA CIÊNCIA AGRONÔMICA, 51 (5). <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200100>
6. Martins, F. S., Fornari Junior, J. C. F., Mazieri, M. R., Gaspar, M. A. (2023). A fuzzy AHP analysis of potential criteria for initiatives in digital transformation for agribusiness. Revista de Administração Mackenzie, 24 (1). Available at: <https://www.scielo.br/j/ram/a/f4gBJmGJBDzC4HBDZQbHkKR/?format=pdf&lang=en>
7. Kanellos, N., Karountzos, P., Giannakopoulos, N. T., Terzi, M. C., Sakas, D. P. (2024). Digital Marketing Strategies and Profitability in the Agri-Food Industry: Resource Efficiency and Value Chains. Sustainability, 16 (14), 5889. <https://doi.org/10.3390/su16145889>
8. Ravi, S., Rajasekaran, S. R. C. (2023). A Perspective of Digital Marketing in Rural Areas: a Literature Review. International Journal of Professional Business Review, 8 (4), e01388. <https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i4.1388>
9. Dang, Y., Ma, H., Wang, J., Zhou, Z., Xu, Z. (2022). An Improved Multi-Objective Optimization Decision Method Using NSGA-III for a Bivariate Precision Fertilizer Applicator. Agriculture, 12 (9), 1492. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091492>
10. Chen, H. (2023). Enterprise marketing strategy using big data mining technology combined with XGBoost model in the new economic era. PLOS ONE, 18 (6), e0285506. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285506>
11. Chen, Z., Wang, Y., Zou, X., Wang, H. (2024). A Multi-Objective Optimization Model for Agricultural Crop Planting Strategies Using Enhanced Genetic Algorithms and Big Data Analysis. Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences, 4, 142–152. <https://doi.org/10.62051/52ckrn48>
12. Perera, A. T. D., Attalage, R. A., Perera, K. K. C. K., Dassanayake, V. P. C. (2013). A hybrid tool to combine multi-objective optimization and multi-criterion decision making in designing standalone hybrid energy systems. Applied Energy, 107, 412–425. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.049>
13. Yazdani, H., Baneshi, M., Yaghoubi, M. (2023). Techno-economic and environmental design of hybrid energy systems using multi-objective optimization and multi-criteria decision making methods. Energy

Conversion and Management, 282, 116873. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116873>

14. Elkadeem, M. R., Younes, A., Sharshir, S. W., Campana, P. E., Wang, S. (2021). Sustainable siting and design optimization of hybrid renewable energy system: A geospatial multi-criteria analysis. *Applied Energy*, 295, 117071. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117071>
15. Mazzeo, D., Baglivo, C., Matera, N., Congedo, P. M., Oliveti, G. (2020). A novel energy-economic-environmental multi-criteria decision-making in the optimization of a hybrid renewable system. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101780. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101780>
16. Ishibuchi, H., Imada, R., Setoguchi, Y., Nojima, Y. (2016). Performance comparison of NSGA-II and NSGA-III on various many-objective test problems. 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). <https://doi.org/10.1109/cec.2016.7744174>
17. Vesikar, Y., Deb, K., Blank, J. (2018). Reference Point Based NSGA-III for Preferred Solutions. 2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). <https://doi.org/10.1109/ssci.2018.8628819>
18. Mosa, M. A. (2025). Optimizing text classification accuracy: a hybrid strategy incorporating enhanced NSGA-II and XGBoost techniques for feature selection. *Progress in Artificial Intelligence*, 14 (2), 275–299. <https://doi.org/10.1007/s13748-025-00365-0>
19. Behera, A. P., Dhawan, A., Rathinakumar, V., Bharadwaj, M., Rajput, J. S., Sethi, K. C. (2024). Optimizing time, cost, environmental impact, and client satisfaction in sustainable construction projects using LHS-NSGA-III: a multi-objective approach. *Asian Journal of Civil Engineering*, 26 (2), 761–776. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01221-7>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.331018

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF MULTICRITERIA EVALUATION OF HIERARCHICAL SYSTEMS (p. 18–24)

Oleg Sova

National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7200-8955>

Oleksandr Stanovskiy

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0360-1173>

Taras Hurskiy

Research Institute of Military Intelligence, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7646-853X>

Valentyn Olshanskyi

Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes of Kruty, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5788-8173>

Oleksandr Volkov

Yevhenii Bereznyak Military Academy, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3777-6195>

Serhii Shostak

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1234-1024>

Vitalii Bezuhlyi

National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5051-5676>

Hryhorii Tikhonov

National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1941-744X>

Olena Chaikovska

National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0656-9105>

Leonid Razarionov

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7597-2053>

Multicriteria evaluation offers undeniable advantages over single-criterion assessment methods. The object of the study is hierarchical systems. The subject of the study is the process of multicriteria evaluation of the state of hierarchical systems. A method for multicriteria evaluation of hierarchical systems is proposed. The originality of the method lies in the application of additional advanced procedures that allow for the following:

- verification of input data and refinement of inter-element connections within the hierarchical system using an enhanced penguin swarm algorithm. This minimizes the risk of errors resulting from incorrect data input in the assessment of the operational military (force) grouping;
- description of external and internal factors affecting the hierarchical system subject to multicriteria evaluation through the use of fuzzy cognitive models;
- adaptation to the type of hierarchical system via multilevel adjustment of the system of indicators and evaluation criteria;
- reduction of uncertainty through the use of interval-valued Pythagorean fuzzy sets, thereby improving the reliability of multicriteria assessment of hierarchical system states;
- identification of the most vulnerable elements within the hierarchical system using a fault tree analysis;
- adaptation of the membership function type depending on the system's available computational resources, which ensures compatibility with existing computational capacities.

An example of the method's application is demonstrated through the multicriteria evaluation of an operational military (force) grouping. The proposed method provides an average improvement of 35% in accuracy and efficiency, while ensuring a high convergence rate of results at the level of 93.17%.

Keywords: system of indicators, vulnerability tree, penguin swarm algorithm, destabilizing factors, military (force) grouping.

References

1. Sova, O., Radzivilov, H., Shyshatskiy, A., Shvets, P., Tkachenko, V., Nevhad, S. et al. (2022). Development of a method to improve the reliability of assessing the condition of the monitoring object in special-purpose information systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (3 (116)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254122>
2. Dudnyk, V., Sinenko, Y., Matsyk, M., Demchenko, Y., Zhyvotovskiy, R., Repilo, I. et al. (2020). Development of a method for training artificial neural networks for intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (2 (105)), 37–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203301>
3. Sova, O., Shyshatskiy, A., Salnikova, O., Zhuk, O., Trotsko, O., Hrokholskiy, Y. (2021). Development of a method for assessment and forecasting of the radio electronic environment. *EUREKA: Physics and Engineering*, 4, 30–40. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001940>
4. Pievtsov, H., Turinskiy, O., Zhyvotovskiy, R., Sova, O., Zvieriev, O., Lanetskii, B., Shyshatskiy, A. (2020). Development of an advanced method of finding solutions for neuro-fuzzy expert systems of analysis of the radioelectronic situation. *EUREKA: Physics and Engineering*, 4, 78–89. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001353>
5. Zuiev, P., Zhyvotovskiy, R., Zvieriev, O., Hatsenko, S., Kuprii, V., Nakonechnyi, O. et al. (2020). Development of complex methodology

- of processing heterogeneous data in intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (9 (106)), 14–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208554>
6. Wang, J., Neil, M., Fenton, N. (2020). A Bayesian network approach for cybersecurity risk assessment implementing and extending the FAIR model. *Computers & Security*, 89, 101659. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101659>
 7. Matheu-García, S. N., Hernández-Ramos, J. L., Skarmeta, A. F., Baldini, G. (2019). Risk-based automated assessment and testing for the cybersecurity certification and labelling of IoT devices. *Computer Standards & Interfaces*, 62, 64–83. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2018.08.003>
 8. Henriques de Gusmão, A. P., Mendonça Silva, M., Poletto, T., Camara e Silva, L., Cabral Seixas Costa, A. P. (2018). Cybersecurity risk analysis model using fault tree analysis and fuzzy decision theory. *International Journal of Information Management*, 43, 248–260. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2018.08.008>
 9. Folorunso, O., Mustapha, O. A. (2015). A fuzzy expert system to Trust-Based Access Control in crowdsourcing environments. *Applied Computing and Informatics*, 11 (2), 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.aci.2014.07.001>
 10. Mohammad, A. (2020). Development of the concept of electronic government construction in the conditions of synergetic threats. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (2 (53)), 42–46. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.207066>
 11. Bodin, L. D., Gordon, L. A., Loeb, M. P., Wang, A. (2018). Cybersecurity insurance and risk-sharing. *Journal of Accounting and Public Policy*, 37 (6), 527–544. <https://doi.org/10.1016/j.jaccpubpol.2018.10.004>
 12. Cormier, A., Ng, C. (2020). Integrating cybersecurity in hazard and risk analyses. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 64, 104044. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104044>
 13. Hoffmann, R., Napiórkowski, J., Protasowicki, T., Stanik, J. (2020). Risk based approach in scope of cybersecurity threats and requirements. *Procedia Manufacturing*, 44, 655–662. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.243>
 14. Perrine, K. A., Levin, M. W., Yahia, C. N., Duell, M., Boyles, S. D. (2019). Implications of traffic signal cybersecurity on potential deliberate traffic disruptions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 120, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.12.009>
 15. Promyslov, V. G., Semenov, K. V., Shumov, A. S. (2019). A Clustering Method of Asset Cybersecurity Classification. *IFAC-PapersOnLine*, 52 (13), 928–933. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.313>
 16. Zarreh, A., Saygin, C., Wan, H., Lee, Y., Bracho, A. (2018). A game theory based cybersecurity assessment model for advanced manufacturing systems. *Procedia Manufacturing*, 26, 1255–1264. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.162>
 17. Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24 (1), 65–75. [https://doi.org/10.1016/s0020-7373\(86\)80040-2](https://doi.org/10.1016/s0020-7373(86)80040-2)
 18. Koval, M., Sova, O., Shyshatskyi, A., Artabaiev, Y., Garashchuk, N., Yivzhenko, Y. et al. (2022). Improving the method for increasing the efficiency of decision-making based on bio-inspired algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (4 (120)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268621>
 19. Maccarone, A. D., Brzorad, J. N., Stone, H. M. (2008). Characteristics And Energetics Of Great Egret And Snowy Egret Foraging Flights. *Waterbirds*, 31 (4), 541–549. <https://doi.org/10.1675/1524-4695-31.4.541>
 20. Litvinenko, O., Kashkevich, S., Shyshatskyi, A., Dmytriieva, O., Neronov, S., Plekhova, G. et al.; Shyshatskyi, A. (Ed.) (2024). *Information and control systems: modelling and optimizations*. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, 180. <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-04-7>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.332092

IMPLEMENTATION OF NON-LINEAR DEFUZZIFICATION OF LINGUISTIC INDICATORS OF PREFERENCES IN THE SAATY'S ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (p. 25–33)

Oleksii Reva

State Scientific Institution "Ukrainian Institute of Scientific and Technical Expertise and Information", Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2795-4587>

Volodymyr Kamyshyn

State Scientific Institution "Ukrainian Institute of Scientific and Technical Expertise and Information", Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8832-9470>

Serhii Borsuk

State Scientific Institution "Ukrainian Institute of Scientific and Technical Expertise and Information", Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7034-7857>

Pavlo Mamenko

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7358-9299>

Kostiantyn Kyrychenko

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0974-6904>

Larysa Sahanovska

Flight Academy of the National Aviation University,
Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2560-4383>

The object of the study is the method of hierarchy analysis, as it is more widely used for solving multicriteria decision-making problems (DM). The subject is the Saaty preference level scale and methods for establishing normalized weight coefficients (NWC). The problem is to increase the accuracy of multicriteria decisions, where the linear defuzzification of linguistic preference indicators (PI), used to form pairwise comparison matrices (PCM), does not correspond to the peculiarities of human thinking. The essence of the results is that for basic IPs ($IP_9, IP_7, IP_5, IP_3, IP_1$) NWCs are established by the mathematical method of prioritization (MPM), adapted for the needs of research, for intermediate IPs (IP_8, IP_6, IP_4, IP_2) – by multiplicative aggregation of NWCs of neighboring PIs. The peculiarity is that it is established that the application of the results of the II iteration of MoP with XII, which are nonlinear, form a step scale, and provide the proper accuracy of priority measurements, is acceptable. The quantitative indicator of sensitivity to the measurement of linguistic preferences increased by 4.5 times compared to the linear scale. However, the average quantitative indicator of the establishment of false IP in the nonlinear scale turned out to be 1.84 times higher than in the linear one. which places additional requirements on the competence of experts, as well as the need to control their attentiveness during the PCM formation.

The relative quantitative indicator corresponding to the increase in the NWC of the Saaty scale terms, formed using the modifier "very" by performing the fuzzy operation "concentration", has increased almost twice, "double concentration" – by a third. Which is more consistent with the quantitative-qualitative logic of the relationship between the specified terms. The practical use of the obtained results will help prevent the negative phenomenon of rank reversal in multi-criteria DM problems.

Keywords: hierarchy analysis method, preference levels, linguistic indicators, normalized weight coefficients.

References

1. Rotshtein, O. P., Shtovba, S. D., Kozachko, O. M. (2007). *Modeliuvannya ta optymizatsiya nadiynosti bahatovymirnykh alhorytmichnykh protsesiv*. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 211.

2. Kovalchuk, V. M. (2010) Osoblyvosti rozv'yazannia bahatokryterialnykh zadach pryiniattia rishen u nechitkomu seredovyschchi. Finansova systema Ukrainy. Naukovi zapysky. Seriya "Ekonomika", 14, 447–456. Available at: <https://eprints.ua.edu.ua/id/eprint/6803/>
3. Reva, O. M., Kamyshyn, V. V., Borsuk, S. P., Yarotskyi, S. V., Sahanovska, L. A. (2023). Metodolohiya systemno-informatsiynoi kvalimetriyi investytsiynoi pryvablyvosti obektiv ekspertyz. Kyiv: UkrINTEL, 150.
4. Taherdoost, H., Madanchian, M. (2023). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. Encyclopedia, 3 (1), 77–87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>
5. Metody vyrishennia zadach bahatokryterialnoi optymizatsiyi (2024). Odesa: Odes. nats. un-t im. I.I. Mech-nykova, 50. Available at: <https://dspace.onu.edu.ua/items/0a0bbbbe-81da-45e2-9703-fed7261b3a11>
6. Saaty, T. L. (2009). Mathematical Principles of Decision Making (Principia Mathematica Decernendi). Pittsburgh: RWS.
7. Millar, L. A., McCallum, J., Burston, L. M. (2010). Use of the conjoint value hierarchy approach to measure the value of the national continence management strategy. The Australian and New Zealand Continence Journal, 16 (3), 81–86.
8. Khan, A. U., Ali, Y. (2020). Analytical hierarchy process (AHP) and analytic network process methods and their applications: a twenty year review from 2000-2019. International Journal of the Analytic Hierarchy Process, 12 (3). <https://doi.org/10.13033/ijahp.v12i3.822>
9. Ivanova, N., Ganzha, O., Podkovyrov, I. (2020). The use of the Analytic Hierarchy Process in Determination of the Design Solution for Vertical Gardening. Journal of Physics: Conference Series, 1614 (1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012035>
10. Krenicky, T., Hrebenyk, L., Chernobrovchenko, V. (2022). Application of Concepts of the Analytic Hierarchy Process in Decision-Making. Management Systems in Production Engineering, 30 (4), 304–310. <https://doi.org/10.2478/mspe-2022-0039>
11. Oleniacz, G., Skrzypczak, I., Leń, P. (2019). Decision-making models using the Analytical Hierarchy Process in the urgency of land consolidation works. Journal of Water and Land Development, 43 (1), 144–150. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0072>
12. Vartanyan, V. M., Shteinbrekher, D. A. (2019). Application of the hierarchy analysis technique for the design of high-technological projects knowledge management strategy. Radioelectronic and Computer Systems, 2 (90), 118–126. <https://doi.org/10.32620/reks.2019.2.11>
13. Nisfoian, S., Sysloina, N., Savelenko, H. (2020). Improving the Efficiency of Investment Project Selection Mechanisms at the Enterprise. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Economic Sciences, 5 (38), 228–237. [https://doi.org/10.32515/2663-1636.2020.5\(38\).228-237](https://doi.org/10.32515/2663-1636.2020.5(38).228-237)
14. Alshaibi, A., Kahraman, G. D., Qasim, A. (2016). Analytic Hierarchy Process (AHP) as criteria in business decision making and their implementation in practice. International Journal of Management and Business Studies, 6 (2), 209–220. Available at: <https://www.internationaljournals.com/abstract/analytic-hierarchy-process-ahp-as-criteria-in-business-decision-making-and-their-implementation-in-practice-61841.html>
15. Taherdoost, H. (2017). Decision Making Using the Analytic Hierarchy Process (AHP): A Step by Step Approach. International Journal of Economics and Management System, 2, 244–246. Available at: <https://hal.science/hal-02557320>
16. Tavana, M., Soltanifar, M., Santos-Arteaga, F. J. (2021). Analytical hierarchy process: revolution and evolution. Annals of Operations Research, 326 (2), 879–907. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04432-2>
17. Koo, M., Yang, S.-W. (2025). Likert-Type Scale. Encyclopedia, 5 (1), 18. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia5010018>
18. Mahmoudi, A., Deng, X., Javed, S. A., Zhang, N. (2020). Sustainable Supplier Selection in Megaprojects: Grey Ordinal Priority Approach. Business Strategy and the Environment, 30 (1), 318–339. <https://doi.org/10.1002/bse.2623>

19. Reva, O., Kamyshyn, V., Borsuk, S., Nevynitsyn, A. (2022). α -Method of Air Traffic Controllers' Preference System Specification Over Typical Mistakes Severities. ICT with Intelligent Applications, 679–685. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4177-0_68

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.328928

MLP-KAN: IMPLEMENTATION OF THE KOLMOGOROV-ARNOLD LAYER IN A MULTILAYER PERCEPTRON (p. 34–41)

Oleg Galchonkov

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5468-7299>

Oleksii Baranov

Oracle World Headquarters, Austin, USA
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5951-2636>

Oleh Maslov

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0288-0289>

Mykola Babych

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3946-9880>

Illia Baskov

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3517-6773>

The object of this study is neural networks used for categorizing objects in images. The task addressed in the work is to identify options for building a multilayer perceptron architecture that apply the Kolmogorov-Arnold layer and are characterized by the best ratio of classification quality and computational effort.

The paper proposes a modification to the multilayer perceptron (MLP) by replacing the first hidden layer with a Kolmogorov-Arnold layer. This allowed the use of the approximating properties of neurons and learning activation functions simultaneously. A feature of the designed MLP-KAN neural network, unlike the classical KAN network, is the use of only one activation function for each of the input elements. The training of activation functions is carried out on the basis of invariant radial basis functions, which are composed using learning weight coefficients. Such construction of the MLP-KAN neural network architecture allowed the use of typical libraries and optimizers for its training. In this case, unlike known analogs, there is no slowdown in the learning speed.

Experimental studies on the handwritten digit dataset (MNIST) have shown that MLP-KAN could provide higher classification quality with less computational effort. In particular, to obtain classification quality comparable to MLP, with the appropriate parameter setting, MLP-KAN requires 3.63 times less computational effort than MLP. This makes it possible to significantly improve the efficiency of image object classification devices built on microprocessors operating under an autonomous mode as part of robotic systems.

Keywords: multilayer perceptron, neural network, Kolmogorov-Arnold network, weight coefficients, radial basis functions.

References

1. Hornik, K., Stinchcombe, M., White, H. (1989). Multilayer feedforward networks are universal approximators. Neural Networks, 2 (5), 359–366. [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8)
2. Liu, Z., Wang, Y., Vaidya, S., Ruehle, F., Halverson, J., Soljačić, M. et al. (2024). KAN: Kolmogorov-Arnold Networks. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.19756>
3. Braun, J., Griebel, M. (2009). On a Constructive Proof of Kolmogorov's Superposition Theorem. Constructive Approximation, 30 (3), 653–675. <https://doi.org/10.1007/s00365-009-9054-2>

4. Guo, H., Li, F., Li, J., Liu, H. (2025). KAN v.s. MLP for Offline Reinforcement Learning. ICASSP 2025 – 2025 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 1–5. <https://doi.org/10.1109/icassp49660.2025.10888327>
5. Yu, R., Yu, W., Wang, X. (2024). KAN or MLP: A Fairer Comparison. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.16674>
6. He, Y., Xie, Y., Yuan, Z., Sun, L. (2024). MLP-KAN: Unifying Deep Representation and Function Learning. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.03027>
7. Xu, K., Chen, L., Wang, S. (2024). Kolmogorov-Arnold Networks for Time Series: Bridging Predictive Power and Interpretability. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.02496>
8. Gao, Y., Hu, Z., Chen, W.-A., Liu, M., Ruan, Y. (2025). A revolutionary neural network architecture with interpretability and flexibility based on Kolmogorov-Arnold for solar radiation and temperature forecasting. *Applied Energy*, 378, 124844. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124844>
9. Jamali, A., Roy, S. K., Hong, D., Lu, B., Ghamisi, P. (2024). How to Learn More? Exploring Kolmogorov-Arnold Networks for Hyperspectral Image Classification. *Remote Sensing*, 16 (21), 4015. <https://doi.org/10.3390/rs16214015>
10. Roy, S. K., Krishna, G., Dubey, S. R., Chaudhuri, B. B. (2020). HybridSN: Exploring 3-D-2-D CNN Feature Hierarchy for Hyperspectral Image Classification. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17 (2), 277–281. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2019.2918719>
11. Li, W., Li, L., Peng, M., Tao, R. (2025). KANDiff: Kolmogorov-Arnold Network and Diffusion Model-Based Network for Hyperspectral and Multispectral Image Fusion. *Remote Sensing*, 17 (1), 145. <https://doi.org/10.3390/rs17010145>
12. Liu, X., Tang, Z., Wei, J. (2025). Multi-Layer Perceptron Model Integrating Multi-Head Attention and Gating Mechanism for Global Navigation Satellite System Positioning Error Estimation. *Remote Sensing*, 17 (2), 301. <https://doi.org/10.3390/rs17020301>
13. Guo, L., Wang, Y., Guo, M., Zhou, X. (2024). YOLO-IRS: Infrared Ship Detection Algorithm Based on Self-Attention Mechanism and KAN in Complex Marine Background. *Remote Sensing*, 17 (1), 20. <https://doi.org/10.3390/rs17010020>
14. Abd Elaziz, M., Ahmed Fares, I., Aseeri, A. O. (2024). CKAN: Convolutional Kolmogorov-Arnold Networks Model for Intrusion Detection in IoT Environment. *IEEE Access*, 12, 134837–134851. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3462297>
15. Bodner, A. D., Tepsich, A. S., Spolski, J. N., Pourteau, S. (2024). Convolutional Kolmogorov-Arnold Networks. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.13155>
16. Drokin, I. (2024). Kolmogorov-Arnold Convolutions: Design Principles and Empirical Studies. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.01092>
17. Cheon, M. (2024). Demonstrating the Efficacy of Kolmogorov-Arnold Networks in Vision Tasks. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.14916>
18. Wang, C., Zhang, X., Liu, L. (2025). FloodKAN: Integrating Kolmogorov-Arnold Networks for Efficient Flood Extent Extraction. *Remote Sensing*, 17 (4), 564. <https://doi.org/10.3390/rs17040564>
19. Seydi, S. T. (2024). Exploring the Potential of Polynomial Basis Functions in Kolmogorov-Arnold Networks: A Comparative Study of Different Groups of Polynomials. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.02583>
20. Ismayilova, A., Ismayilov, M. (2023). On the universal approximation property of radial basis function neural networks. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 92 (3), 691–701. <https://doi.org/10.1007/s10472-023-09901-x>
21. He, Z.-R., Lin, Y.-T., Lee, S.-J., Wu, C.-H. (2018). A RBF Network Approach for Function Approximation. 2018 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), 105–109. <https://doi.org/10.1109/icinfa.2018.8812435>
22. Panda, S., Panda, G. (2022). On the Development and Performance Evaluation of Improved Radial Basis Function Neural Networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 52 (6), 3873–3884. <https://doi.org/10.1109/tsmc.2021.3076747>
23. Seghouane, A.-K., Shokouhi, N. (2021). Adaptive Learning for Robust Radial Basis Function Networks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 51 (5), 2847–2856. <https://doi.org/10.1109/tcyb.2019.2951811>
24. Wu, C., Kong, X., Yang, Z. (2018). An Online Self-Adaption Learning Algorithm for Hyper Basis Function Neural Network. 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communication, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 215–220. <https://doi.org/10.1109/imcec.2018.8469684>
25. Galchonkov, O., Baranov, O., Antoshchuk, S., Maslov, O., Babych, M. (2024). Development of a neural network with a layer of trainable activation functions for the second stage of the ensemble classifier with stacking. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (9 (131)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311778>
26. LeCun, Y., Cortes, C. and Burges, C. J. C. (1998). *The MNIST Database of Handwritten Digits*. New York.
27. MLP-KAN. Available at: <https://github.com/oleksii-m-baranov/MLP-KAN>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.329685

DEVELOPMENT OF A VARIANCE-BASED DETERMINISTIC ALGORITHM FOR STOCHASTIC MST IN DISTRIBUTION NETWORKS (p. 42–51)

Anna Angela Sitinjak

Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0894-8643>

Saib Suwilo

Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6653-9127>

Mardiningsih Mardiningsih

Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9099-6239>

Sutarman Sutarmman

Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2171-9260>

This study addresses constructing Minimum Spanning Trees (MST) in stochastic weighted distribution networks, where edge costs have inherent uncertainties with known means and variances. Traditional deterministic methods often fail, and existing stochastic approaches are frequently unstable or computationally complex under high uncertainty. A novel variance-based deterministic transformation algorithm is proposed. Its core feature is transforming stochastic edge costs into robust deterministic equivalents by computing an aggregate variance term from the largest $(n - 1)$ edge variances, enabling MST construction via classical algorithms. This method fundamentally enhances stability and ensures feasibility, particularly in high-variance scenarios, improving upon traditional confidence interval-based techniques. The algorithm's efficacy was rigorously validated. Its performance was compared against a probabilistic Q_{ij} -based method under moderate variance, demonstrating consistent and accurate MSTs. It was then applied to a complex 21-edge distribution network with high variance parameters. Results confirm the algorithm's broad applicability, precision, and capability to construct reliable spanning trees under both moderate and substantial uncertainty. The algorithm demonstrates significant computational efficiency ($O(r \log r)$), ensuring practicality and scalability across varying uncertainty levels. Unlike iterative or constraint-heavy models, this algorithm simplifies optimization while preserving uncertainty representation. This makes

it well-suited for large-scale networks and real-world systems where cost variability is critical. Future research includes expanding this approach to multi-objective optimization or dynamic networks.

Keywords: spanning tree, stochastic graph, variance-based algorithm, deterministic transformation, uncertainty modeling, network optimization.

References

- Luo, S., Yimamu, N., Li, Y., Wu, H., Irfan, M., Hao, Y. (2022). Digitalization and sustainable development: How could digital economy development improve green innovation in China? *Business Strategy and the Environment*, 32 (4), 1847–1871. <https://doi.org/10.1002/bse.3223>
- Feng, R., Qu, X. (2023). Innovation-Driven Industrial Agglomeration Impact on Green Economic Growth in the Yellow River Basin: An Empirical Analysis. *Sustainability*, 15 (17), 13264. <https://doi.org/10.3390/su151713264>
- Mor, S., Ravindra, K. (2023). Municipal solid waste landfills in lower- and middle-income countries: Environmental impacts, challenges and sustainable management practices. *Process Safety and Environmental Protection*, 174, 510–530. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.014>
- Sinha, S. K., Davis, C., Gardoni, P., Babbar-Sebens, M., Stuhr, M., Huston, D. et al. (2023). Water Sector Infrastructure Systems Resilience A Social-Ecological-Technical System-of-Systems and Whole-Life Approach. *Cambridge Prisms: Water*, 1–50. <https://doi.org/10.1017/wat.2023.3>
- Israilova, E., Voronina, A., Shatila, K. (2023). Impact of water scarcity on socio-economic development. *E3S Web of Conferences*, 458, 08027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345808027>
- Koutsokosta, A., Katsavounis, S. (2024). Stochastic transitions of a mixed-integer linear programming model for the construction supply chain: chance-constrained programming and two-stage programming. *Operational Research*, 24 (3). <https://doi.org/10.1007/s12351-024-00856-3>
- Talebi, A., Haeri Boroujeni, S. P., Razi, A. (2024). Integrating random regret minimization-based discrete choice models with mixed integer linear programming for revenue optimization. *Iran Journal of Computer Science*, 8 (1), 21–35. <https://doi.org/10.1007/s42044-024-00193-w>
- Heidari, A., Shishehlou, H., Darbandi, M., Navimipour, N. J., Yalcin, S. (2024). A reliable method for data aggregation on the industrial internet of things using a hybrid optimization algorithm and density correlation degree. *Cluster Computing*, 27 (6), 7521–7539. <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04351-4>
- Ishii, H., Shiode, S., Nishida, T., Namasuya, Y. (1981). Stochastic spanning tree problem. *Discrete Applied Mathematics*, 3 (4), 263–273. [https://doi.org/10.1016/0166-218x\(81\)90004-4](https://doi.org/10.1016/0166-218x(81)90004-4)
- Akbari Torkestani, J., Meybodi, M. R. (2010). A learning automata-based heuristic algorithm for solving the minimum spanning tree problem in stochastic graphs. *The Journal of Supercomputing*, 59 (2), 1035–1054. <https://doi.org/10.1007/s11227-010-0484-1>
- Zhao, L., Huang, Y., Dai, Q., Yang, L., Chen, F., Wang, L. et al. (2019). Multistage Active Distribution Network Planning With Restricted Operation Scenario Selection. *IEEE Access*, 7, 121067–121080. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2936936>
- Xu, Y., Zhang, L. (2023). Target-based Distributionally Robust Minimum Spanning Tree Problem. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.10670>
- Hoeksma, R., Speek, G., Uetz, M. (2024). Stochastic Minimum Spanning Trees with a Single Sample. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.16119>
- Mathwieser, C., Çela, E. (2024). Special cases of the minimum spanning tree problem under explorable edge and vertex uncertainty. *Networks*, 83 (3), 587–604. <https://doi.org/10.1002/net.22204>
- Makowiec, L., Salvi, M., Sun, R. (2024). Random spanning trees in random environment. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.16830>
- Adhikary, K., Pal, P., Poray, J. (2024). The minimum spanning tree problem on networks with neutrosophic numbers. *Neutrosophic Sets and Systems*, 63, 258–270. Available at: <https://fs.unm.edu/NSS/SpanningTree16.pdf>
- Hu, Z., Sun, W., Zhu, S. (2022). Chance constrained programs with Gaussian mixture models. *IIE Transactions*, 54 (12), 1117–1130. <https://doi.org/10.1080/24725854.2021.2001608>
- Chatterjee, S., Pandurangan, G., Pham, N. D. (2020). Distributed MST. *Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing and Networking*, 1–10. <https://doi.org/10.1145/3369740.3369778>

DOI 10.15587/1729-4061.2025.330644

DEVISING A METHOD FOR INCREASING DATA TRANSMISSION SPEED IN MONITORING SYSTEMS BASED ON THE MOBILE HIGH-DENSITY INTERNET OF THINGS (p. 52–61)

Heorhii Kuchuk

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2862-438X>

Oleksandr Mozhaiev

Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1412-2696>

Serhii Tiulieniev

National Scientific Center "Hon. Prof. M. S. Bokarius Forensic Science Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9685-1536>

Mykhailo Mozhaiev

Scientific Research Center for Forensic Expertise in the Field of Information Technologies and Intellectual Property of the Ministry of Justice of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1566-9260>

Nina Kuchuk

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0784-1465>

Liliia Tymoshchyk

Scientific Research Center for Forensic Expertise in the Field of Information Technologies and Intellectual Property of the Ministry of Justice of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7695-2169>

Andrii Lubentsov

Scientific Research Center for Forensic Expertise in the Field of Information Technologies and Intellectual Property of the Ministry of Justice of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1419-6433>

Yurii Onishchenko

Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7755-3071>

Yurii Gnusov

Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9017-9635>

Mykhailo Tsuranov

Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2115-7029>

The object of this study is the process that improves the efficiency of data transmission in monitoring systems that arrive from low-power devices within the mobile high-density Internet of Things.

The task addressed was to reduce the average delay time of information transmission through the transmitting station of the monitoring system gateway. To this end, it was proposed to improve the multiple output procedure and use the technique for building temporary dynamic clusters of dependent sources.

During the research, a model of a monitoring system with multiple node outputs was built. Its process involved the procedure for constructing a temporary subset of active devices dependent on data. That made it possible to reduce the redundancy of data coming to the monitoring system gateway.

An approach has been proposed for finding the values of the upper and lower limits of the average data transmission delay. The approach is based on simplifying calculations by switching to a one-dimensional Markov chain. The use of a uniform distribution of active subscribers has made it possible to find an analytical expression for the upper limit of the average delay. A feature of the lower bound calculation process is the introduction of a fixed division of the receiving zone of the transmitting station into equal sectors.

The algorithm developed for multiple node output is aimed at reducing the average data transmission delay with a limited number of subscribers. A feature of the method is the limitation of the number of transitions when forming a stationary distribution of the Markov chain. As a result of using the method, the average delay is reduced and the speed of data transmission increases. Studies of the proposed method have shown that the speed of data transmission increases in comparison with existing methods from 5 to 50%. The research results are attributed to the use of the procedure of multiple subscriber output.

Keywords: Internet of Things, Markov chain, high-density, random multiple access system.

References

- Kuchuk, H., Malokhvii, E. (2024). Integration of IoT with Cloud, Fog, and Edge Computing: a Review. *Advanced Information Systems*, 8 (2), 65–78. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.08>
- Amitu, D. M., Akol, R. N., Serugunda, J. (2025). Hybrid access control mechanism for massive machine type communications. *Discover Internet of Things*, 5 (1). <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00106-8>
- Zhao, D., Wang, H., Du, H., Cheng, H., Peng, L., Liang, Y. et al. (2025). An intelligent bridge multi-dimension deflection IoT monitoring system based on laser datum and imaging. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 12 (2), 269–287. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.06.006>
- Harwahu, R., Cheng, R.-G., Liu, D.-H., Sari, R. F. (2021). Fair Configuration Scheme for Random Access in NB-IoT with Multiple Coverage Enhancement Levels. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 20 (4), 1408–1419. <https://doi.org/10.1109/tmc.2019.2962422>
- Kuchuk, H., Kalinin, Y., Dotsenko, N., Chumachenko, I., Pakhomov, Y. (2024). Decomposition of integrated high-density IoT data flow. *Advanced Information Systems*, 8 (3), 77–84. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.09>
- Vaiyapuri, T., Parvathy, V. S., Manikandan, V., Krishnaraj, N., Gupta, D., Shankar, K. (2021). A Novel Hybrid Optimization for Cluster-Based Routing Protocol in Information-Centric Wireless Sensor Networks for IoT Based Mobile Edge Computing. *Wireless Personal Communications*, 127 (1), 39–62. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08088-w>
- Shokeen, S., Singh, H. (2023). Multiple Input Multiple Output: An IOT based Application. 2023 International Conference on Advancement in Computation & Computer Technologies (InCACCT), 634–638. <https://doi.org/10.1109/incacct57535.2023.10141742>
- Kuchuk, H., Mozhaiev, O., Kuchuk, N., Tiulieniev, S., Mozhaiev, M., Gnusov, Y. et al. (2024). Devising a method for the virtual clustering of the Internet of Things edge environment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (9 (127)), 60–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298431>
- Singh, S. P., Kumar, N., Kumar, G., Balusamy, B., Bashir, A. K., Dabel, M. M. A. (2025). Enhancing Quality of Service in IoT-WSN through Edge-Enabled Multi-Objective Optimization. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. <https://doi.org/10.1109/tce.2025.3526992>
- Choi, J. (2018). On Multichannel Random Access for Correlated Sources. *IEEE Transactions on Communications*, 66 (8), 3444–3454. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2018.2823318>
- Chetot, L., Egan, M., Gorce, J.-M. (2023). Active User Detection and Channel Estimation for Grant-Free Random Access with Gaussian Correlated Activity. 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring), 1–6. <https://doi.org/10.1109/vtc2023-spring57618.2023.10199877>
- Kuchuk, H., Mozhaiev, O., Tiulieniev, S., Mozhaiev, M., Kuchuk, N., Tymoshchuk, L. et al. (2025). Devising a method for forming a stable mobile cluster of the internet of things fog layer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (4 (133)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322263>
- Alqasimi, A., Al Marzouqi, K., Alhammadi, A., Aljasmi, A., Alnabulsi, A., Al-Ali, A. R. (2025). An IoT-Based Mobile Air Pollution Monitoring System. *Proceedings of IEMTRONICS 2024*, 221–233. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4784-9_16
- Wing Lo, Y., Ho Tsoi, M., Chow, C.-F., Mung, S. W. Y. (2025). An NB-IoT Monitoring System for Digital Mobile Radio With Industrial IoT Performance and Reliability Evaluation. *IEEE Sensors Journal*, 25 (3), 5337–5348. <https://doi.org/10.1109/jsen.2024.3512859>
- Kuchuk, H., Husieva, Y., Novoselov, S., Lysytsia, D., Krykhovetskyi, H. (2025). Load balancing of the layers IoT Fog-Cloud support network. *Advanced Information Systems*, 9 (1), 91–98. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.1.11>
- Foss, S., Turlikov, A., Grankin, M. (2017). Spatial random multiple access with multiple departure. 2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), 2728–2731. <https://doi.org/10.1109/isit.2017.8007025>
- Moon, S., Lee, H.-S., Lee, J.-W. (2018). SARA: Sparse Code Multiple Access-Applied Random Access for IoT Devices. *IEEE Internet of Things Journal*, 5 (4), 3160–3174. <https://doi.org/10.1109/ijot.2018.2835828>
- Kuchuk, H., Mozhaiev, O., Tiulieniev, S., Mozhaiev, M., Kuchuk, N., Tymoshchuk, L. et al. (2025). Devising a method for stabilizing control over a load on a cluster gateway in the internet of things edge layer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (134)), 24–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.326040>
- Zhu, W., Tao, M., Yuan, X., Guan, Y. (2023). Message Passing-Based Joint User Activity Detection and Channel Estimation for Temporally-Correlated Massive Access. *IEEE Transactions on Communications*, 71 (6), 3576–3591. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2023.3261382>
- Kuchuk, N., Kashkevich, S., Radchenko, V., Andrusenko, Y., Kuchuk, H. (2024). Applying edge computing in the execution IoT operative transactions. *Advanced Information Systems*, 8 (4), 49–59. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.07>
- Aqeel Abdulhussein M, A.-M., Smirnova, T., Buravchenko, K., Smirnov, O. (2023). The method of assessing and improving the user experience of subscribers in software-configured networks based on the use of machine learning. *Advanced Information Systems*, 7 (2), 49–56. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.2.07>
- Asvadi, S., Ashtiani, F. (2023). Peak Age of Information in Slotted ALOHA Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 71 (10), 6018–6030. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2023.3296590>
- Semenov, S., Mozhaiev, O., Kuchuk, N., Mozhaiev, M., Tiulieniev, S., Gnusov, Y. et al. (2022). Devising a procedure for defining the general criteria of abnormal behavior of a computer system based on the improved criterion of uniformity of input data samples. *Eastern-*

- European Journal of Enterprise Technologies, 6 (4 (120)), 40–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269128>
24. Munari, A. (2021). Modern Random Access: An Age of Information Perspective on Irregular Repetition Slotted ALOHA. *IEEE Transactions on Communications*, 69 (6), 3572–3585. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2021.3060429>
25. Tzeng, S.-S., Lin, Y.-J., Wang, S.-W. (2025). Age of Information in IoT Devices with Integrated Heterogeneous Sensors under Slotted ALOHA. *IEEE Sensors Journal*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/jsen.2025.3563452>
26. Petrovska, I., Kuchuk, H., Kuchuk, N., Mozhaiev, O., Pochebut, M., Onishchenko, Y. (2023). Sequential Series-Based Prediction Model in Adaptive Cloud Resource Allocation for Data Processing and Security. 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), 1–6. <https://doi.org/10.1109/deSSERT61349.2023.10416496>
27. Zhang, Y., Jing, R., Zou, Y., Cao, Z. (2025). Optimizing power allocation in contemporary IoT systems: A deep reinforcement learning approach. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 46, 101114. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2025.101114>
28. Sobchuk, V., Pykhnivskyi, R., Barabash, O., Korotin, S., Omarov, S. (2024). Sequential intrusion detection system for zero-trust cyber defense of IoT/IIoT networks. *Advanced Information Systems*, 8 (3), 92–99. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.11>
29. Cui, Y., Shi, G., Xu, L., Ji, J. (2023). Average dwell time based networked predictive control for switched linear systems with data transmission time-varying delays. *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, 40 (2), 210–231. <https://doi.org/10.1093/imamci/dnad007>
30. Czapla, D. (2024). On the Existence and Uniqueness of Stationary Distributions for Some Piecewise Deterministic Markov Processes with State-Dependent Jump Intensity. *Results in Mathematics*, 79 (5). <https://doi.org/10.1007/s00025-024-02195-3>

АНОТАЦІЇ

MATHEMATICS AND CYBERNETICS – APPLIED ASPECTS

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.332468

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ЦИФРОВОГО МАРКЕТИНГУ ДЛЯ ПІДПРИЄМСТВ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМУ NSGA-III ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ (с. 6–17)**О. В. Криворучко, Zhansaya Abildaeva, В. А. Лахно, М. І. Цюцюра, С. В. Цюцюра, А. М. Харченко, М. І. Колбасін**

Об'єкт дослідження – процес оптимізації цифрового маркетингу для підприємств агропромислового комплексу в умовах багатокритеріальності та невизначеності. Здійснено формальну постановку задачі оптимізації маркетингових стратегій для агро-виробництва із використанням генетичного алгоритму NSGA-III. Розроблено гібридний метод для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації маркетингових стратегій підприємств агропромислового комплексу. Метод базується на алгоритмі NSGA-III у поєднанні з програмною бібліотекою XGBoost і адаптований до галузевих обмежень для маркетингових стратегій на аграрних ринках України та Республіки Казахстану. Це дозволяє забезпечити генерацію та інтерпретацію Парето-оптимальних стратегій з урахуванням таких критеріїв, як ефективність, охоплення, показника рентабельності інвестицій (ROI), витрати та залучення. Проведено кластерний аналіз рішень, виокремлено три характерні сценарії – збалансований, обережний і агресивний. Емпірична валідація за регресійним аналізом продемонструвала високу точність моделі, а також її здатність до екстраполяції нових рішень. Зокрема, середньоквадратична помилка на тестовій вибірці склала 0,0316 при досягнутому коефіцієнті детермінації 0,9041. Отримані результати підтверджують ефективність розробленого методу для підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності та обмежених ресурсів.

Запропонований метод був покладений в основу розробки програмного продукту, впровадженого на практиці в підприємствах агропромислового комплексу. Проте, сферою використання методу може бути діяльність й інших суб'єктів господарювання, які здійснюють розроблення маркетингових стратегій для досягнення ефективності своєї діяльності.

Ключові слова: гібридний метод, цифровий маркетинг, багатокритеріальна оптимізація, алгоритм NSGA-III, кластерний аналіз.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.331018

РОЗРОБКА МЕТОДУ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ІЄРАРХІЧНИХ СИСТЕМ (с. 18–24)**О. Я. Сова, О. Л. Становський, Т. Г. Гурський, В. В. Ольшанський, О. В. Волков, С. В. Шостак, В. М. Безуглий, Г. М. Тіхонов, О. Є. Чайковська, Л. В. Разарьонов**

Багатокритеріальна оцінка має беззаперечні переваги перед однокритеріальними методами оцінки. Об'єктом дослідження є ієрархічні системи. Предметом дослідження є процес багатокритеріального оцінювання стану ієрархічних систем. Запропоновано метод багатокритеріальної оцінки ієрархічних систем. Оригінальність методу полягає у використанні додаткових удосконалених процедур, які дозволяють:

- здійснювати верифікацію введених даних та уточнення зв'язків між елементами ієрархічної системи за допомогою удосконаленого алгоритму зграї пінгвінів. Зазначене дозволяє мінімізувати похибку введення не коректних даних для роботи про стан оперативного угруповання військ (сил);
- описати зовнішні та внутрішні фактори які впливають на ієрархічну систему, що підлягає багатокритеріальному оцінюванню за допомогою нечітких когнітивних моделей;
- провести адаптацію під тип ієрархічної системи за рахунок багаторівневої адаптації системи показників та критеріїв оцінювання;
- знизити невизначеність за допомогою інтервальної піфагорійської нечіткої множини, чим досягається підвищення достовірності багатокритеріального оцінювання стану ієрархічних систем;
- визначити найбільш вразливі елементи ієрархічної системи за допомогою дерева відмов;
- адаптувати вид функції належності в залежності від наявних обчислювальних ресурсів системи, чим забезпечується адаптація під наявні обчислювальні ресурси.

Приведений приклад використання запропонованого методу для багатокритеріальної оцінки оперативного угруповання військ (сил). Запропонований метод забезпечує підвищення точності та оперативності в середньому на 35%, при забезпеченні високої збіжності отриманих результатів на рівні 93.17%.

Ключові слова: системи показників, дерево вразливостей, алгоритм зграї пінгвінів, дестабілізуючі фактори, угруповання військ (сил).

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.332092

ЗДІЙСНЕННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ДЕФАЗИФІКАЦІЇ ЛІНГВІСТИЧНИХ ІНДИКАТОРІВ ПЕРЕВАГ В МЕТОДІ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ СААТІ (с. 25–33)**О. М. Рева, В. В. Камишин, С. П. Борсук, П. П. Мащенко, К. В. Кириченко, Л. А. Сагановська**

Об'єктом дослідження є метод аналізу ієрархій, як більш застосовуваний для вирішення мультикритеріальних задач прийняття рішень (ПР). Предметом – шкала рівнів переваг Сааті та методи встановлення нормованих вагових коефіцієнтів (НВК). Проблема полягає у підвищенні точності мультикритеріальних рішень, де лінійна дефазифікація лінгвістичних індикаторів переваг (ІП), застосовувана для формування матриць парних порівнянь (МПП), не відповідає особливостям людського мислення. Суть результатів – для базових ІП ($IP_9, IP_7, IP_5, IP_3, IP_1$) НВК встановлені математичним методом розстановки пріоритетів (МРП), адаптованим для потреб досліджень, для проміжних (IP_8, IP_6, IP_4, IP_2) – мультиплікативною агрегацією НВК сусідніх ІП. Особливість – встановлено прийнятним застосування результатів II ітерації МРП з XII, що є нелінійними, формують ступеневу шкалу, забезпечують належну точність вимірів пріоритетів. Кількісний показник чутливості до виміру лінгвістичних переваг зріс 4,5 рази порівняно з лінійною

шкалою. Однак середній показник кількісної оцінки встановлення помилкового ІІ в нелінійній шкалі виявився у 1,84 рази більшим, ніж у лінійній, що висуває додаткові вимоги до компетентності експертів, а також необхідності контролю їх уважності під час формування МПП.

Відносний кількісний показник, що відповідає збільшенню НВК термів шкали Сааті, утвореним за допомогою модифікатора «дуже» шляхом здійснення нечіткої операції «концентрація», зріс майже удвічі, «подвійної концентрації» – на третину. Це більшою мірою відповідає кількісно-якісній логіці співвідношення зазначених термів. Практичне використання отриманих результатів сприятиме запобіганню негативному явищу реверсу рангів у мультикритеріальних задачах ІІР.

Ключові слова: метод аналізу ієрархій, рівні переваг, лінгвістичні індикатори, нормовані вагові коефіцієнти.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.328928

MLP-KAN: РЕАЛІЗАЦІЯ ШАРУ КОЛМОГОРОВА-АРНОЛЬДА У БАГАТОШАРОВОМУ ПЕРСЕПТРОНІ (с. 34–41)

О. М. Галчонков, Oleksii Baranov, O. B. Маслов, М. І. Бабич, І. О. Баськов

Об'єктом дослідження є нейронні мережі, які використовуються для класифікації об'єктів на зображеннях. Проблема, що вирішується в роботі, полягає у виявленні варіантів побудови архітектури багатошарового перцептрона, що використовують шар Колмогорова-Арнольда та відрізняються найкращим співвідношенням якості класифікації та об'єму обчислень. У роботі запропоновано модифікацію багатошарового перцептрона (MLP) за рахунок заміни першого прихованого шару на шар Колмогорова-Арнольда. Це дозволило одночасно використовувати апроксимуючі властивості нейронів і функцій активації, що навчаються. Особливістю розробленої нейронної мережі MLP-KAN на відміну від класичної мережі KAN є використання тільки однієї функції активації для кожного з вхідних елементів. Навчання функцій активації проводиться на основі незмінних радіальних базових функцій, які складаються з використанням вагових коефіцієнтів, що навчаються. Така побудова архітектури нейронної мережі MLP-KAN дозволила використовувати для її навчання типові бібліотеки та оптимізатори. При цьому, на відміну від відомих аналогів, немає уповільнення швидкості навчання. Проведені експериментальні дослідження на базі набору даних рукописних цифр (MNIST) показали, що MLP-KAN може забезпечувати більш високу якість класифікації за меншого обсягу обчислень. Зокрема, для отримання такої якості класифікації, як порівнювана MLP, при відповідному завданні параметрів MLP-KAN вимагає в 3,63 разів менший обсяг обчислень, ніж у MLP. Це дозволяє суттєво підвищити ефективність пристроїв класифікації об'єктів на зображеннях, побудованих на мікропроцесорах, що працюють в автономному режимі у складі роботизованих комплексів.

Ключові слова: багатошаровий перцептрон, нейронна мережа, мережа Колмогорова-Арнольда, вагові коефіцієнти, радіально-базисні функції.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.329685

РОЗРОБКА ДЕТЕРМІНІСТИЧНОГО АЛГОРИТМУ НА ОСНОВІ ВАРІАЦІЙ ДЛЯ СТОХАСТИЧНИХ МІНІМАЛЬНИХ КІСТЯКОВИХ ДЕРЕВ У РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ (с. 42–51)

Anna Angela Sitingjak, Saib Suwilo, Mardiningsih Mardiningsih, Sutarman Sutarman

Це дослідження стосується побудови мінімальних кістякових дерев (МКД) у стохастичних зважених розподільних мережах, де витрати на ребра мають невід'ємні невизначеності з відомими середніми значеннями та дисперсіями. Традиційні детерміновані методи часто дають збій, а існуючі стохастичні підходи часто є нестабільними або обчислювально складними за високої невизначеності. Запропоновано новий алгоритм детерміністичного перетворення на основі дисперсії. Його основною особливістю є перетворення стохастичних витрат на ребра в надійні детерміновані еквіваленти шляхом обчислення агрегованого члена дисперсії з найбільших $(n - 1)$ дисперсій ребер, що дозволяє побудувати МКД за допомогою класичних алгоритмів. Цей метод принципово підвищує стабільність і забезпечує доцільність, особливо у сценаріях з високою дисперсією, покращуючи традиційні методи на основі довірчих інтервалів. Ефективність алгоритму була ретельно перевірена. Його продуктивність порівнювали з ймовірнісним методом на основі Q_i за помірної дисперсії, демонструючи послідовні та точні МКД. Потім його було застосовано до складної 21-реберної розподільчої мережі з високими параметрами дисперсії. Результати підтверджують широку застосовність, точність та здатність алгоритму будувати надійні кістякові дерева як за помірної, так і за значної невизначеності. Алгоритм демонструє значну обчислювальну ефективність ($O(r \log r)$), що забезпечує практичність та масштабованість при різних рівнях невизначеності. На відміну від ітеративних або моделей з важкими обмеженнями, цей алгоритм спрощує оптимізацію, зберігаючи при цьому представлення невизначеності. Це робить його добре придатним для великомасштабних мереж та реальних систем, де мінливість вартості є критично важливою. Майбутні дослідження включають розширення цього підходу до багатоцільової оптимізації або динамічних мереж.

Ключові слова: кістякове дерево, стохастичний граф, алгоритм на основі дисперсії, детерміністичне перетворення, моделювання невизначеності, оптимізація мережі.

DOI 10.15587/1729-4061.2025.330644

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ОПЕРАТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ НА БАЗІ МОБІЛЬНОГО ВИСОКОШІДЛЬНОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (с. 52–61)

Г. А. Кучук, О. О. Можаяев, С. А. Тюленев, М. О. Можаяев, Н. Г. Кучук, Л. П. Тимощик, А. В. Лубенцов, Ю. М. Онищенко, Ю. В. Гнусов, М. В. Цуранов

Об'єктом дослідження є процес підвищення оперативності передачі даних в системах моніторингу, які надходять з малопотужних пристроїв мобільного високошвидкого Інтернету речей. Вирішувалась проблема зменшення середнього часу затримки передачі інформації через передавальну станцію шлюзу системи моніторингу. Для цього запропоновано удосконалити процедуру множинного виходу та використовувати спосіб формування тимчасових динамічних кластерів залежних джерел.

При проведенні досліджень розроблена модель системи моніторингу із множинним виходом вузлів. При розробці використана процедура побудови тимчасової підмножини активних пристроїв, залежних за даними. Це дозволило зменшити надлишковість даних, що надходять до шлюзу системи моніторингу.

Запропонований підхід для знаходження значень верхньої та нижньої границь середньої затримки передачі даних. Підхід базується на спрощенні розрахунків шляхом переходу до одновимірного Марківського ланцюгу. Застосування рівномірного розподілу активних абонентів дозволило знайти аналітичний вираз для верхньої границі середньої затримки. Особливістю процесу обчислення нижньої границі є введення фіксованого розбиття зони прийому передавальної станції на рівні сектори.

Розроблений алгоритм множинного виходу вузлів орієнтований на зменшення середньої затримки передачі даних при обмеженій кількості абонентів. Особливістю методу є обмеження кількості переходів при формуванні стаціонарного розподілу Марківського ланцюга. Внаслідок застосування методу зменшується середня затримка та підвищується оперативність передачі даних. Дослідження запропонованого методу показали, що оперативність передачі даних підвищується у порівнянні з існуючими методами від 5 до 50%. Отримані результати дослідження можна пояснити задіянням процедури множинного виходу абонентів.

Ключові слова: Інтернет речей, Марківський ланцюг, висока щільність, системи випадкового множинного доступу.