

ABSTRACT AND REFERENCES

MATHEMATICS AND CYBERNETICS – APPLIED ASPECTS

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.344556

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR EVALUATING COMPLEX ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS USING NEURO-FUZZY EXPERT SYSTEMS (p. 6–14)**Andrii Shyshatskyi**Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6731-6390>**Ganna Plekhova**Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6912-6520>**Igor Shostak**National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3051-0488>**Olena Feoktystova**National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8490-3108>**Andrii Veretnov**Central Scientifically-Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0160-7325>**Sergii Pronin**Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7475-621X>**Olena Shaposhnikova**Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0405-8205>**Hryhorii Stepanov**National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9190-2821>**Nataliia Hnatiuk**Yevgeny Bereznyak Military Academy, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2807-4065>**Vadym Kaidalov**Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0027-9207>

Complex organizational and technical systems are the object of research. The problem that is solved in the study is an increase in the efficiency of the assessment of the process of operation of complex organizational and technical systems (OTS) while maintaining a given level of reliability. A method of evaluating complex organizational and technical systems using neuro-fuzzy expert systems was developed. The originality of the research is:

- in full coverage of critical events occurring during the OTS operation. This is achieved due to the use of the Dempster-Schafer theory, which achieves the completeness of the assessment of the entire spectrum of critical events in the OTS;

- in a comprehensive description of the process of OTS operation. This makes it possible to increase the accuracy of OTS modeling for subsequent management decisions;

- in the ability to carry out initial adjustment of OTS knowledge bases using an improved genetic algorithm. This allows to reduce the computational complexity during the further formation of the OTS knowledge base by reducing the metric of rule formation in the OTS knowledge base;

- in the ability to model the nature of the development of atypical events in the OTS due to the use of time series, which achieves the possibility of developing preventive measures to minimize the impact of the specified events on the process of OTS operation;

- in the gradual reduction of the metric of the formation of the knowledge base about the states of OTS, due to the training of agents of the improved genetic algorithm. This allows to reduce the number of computing resources of the subsystem for assessing the state of OTS operation;

The proposed method provides an increase in efficiency by an average of 23%, while ensuring high convergence of the obtained results at the level of 93.17%, which is confirmed by the results of a numerical experiment.

Keywords: reliability of technical systems, complex technical systems, efficiency, comprehensive assessment, computing resources.

References

1. Sova, O., Radzivilov, H., Shyshatskyi, 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., Shyshatskyi, A., Salnikova, O., Zhuk, O., Trotsko, O., Hrokholskyi, 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., Turinskyi, O., Zhyvotovskiy, R., Sova, O., Zvieriev, O., Lanetskii, B., Shyshatskyi, 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. Shyshatskyi, A. (Ed.) (2024). Information and control systems: modelling and optimizations. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC. <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-04-7>
20. Voznytsia, A., Sharonova, N., Babenko, V., Ostapchuk, V., Neronov, S., Feoktystov, S. et al. (2025). Development of methods for intelligent assessment of parameters in decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (4 (136)), 73–82. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.337528>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.344553

DEVISING A METHOD FOR MANAGING COMPUTING RESOURCES IN A FOG LAYER OF THE MOBILE HIGH-DENSITY INTERNET OF THINGS (p. 15–25)

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

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/0000-0001-9685-1536>

Mykhailo Mozhaiev

Dnipropetrovsk Research Institute of Forensic Examinations
of the Ministry of Justice of Ukraine, Dnipro, 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>

Pavlo Khorobrykh

Dnipropetrovsk Research Institute of Forensic Examinations
of the Ministry of Justice of Ukraine, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0879-4122>

Yurii Gnusov

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

Yurii Horelov

Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0330-5008>

Vitalii Svitlychnyi

Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3381-3350>

Oleksandr Bilyk

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4846-1585>

This study considers a process that manages the distribution of computing resources in the fog layer of the mobile high-density Internet of Things. The task addressed is to reduce the load imbalance of fog servers by devising a method for controlling computing resources in the fog layer when processing information flows.

Information flows are formed by intelligent gateways of the mobile high-density Internet of Things, which receive data from the boundary layer. In the process of research, a mathematical model for the process of controlling computing resources in the fog layer was built. Its main difference from existing ones is a module hierarchical structure according to the basic levels of decision-making when managing computing resources.

When constructing the model, the principle of process decomposition into adjacent time intervals was used. Its application made it possible to carry out local optimization of the process of managing computing resources in short time intervals. The mathematical model

has made it possible to devise a method for controlling computing resources in the fog layer.

The main difference of this method from existing ones is that the process optimization is carried out according to the area of the relative deviation from the balanced load in the time interval under study. In addition, a two-stage algorithm for distributing tasks of free fog devices across fog layer servers is also used. That made it possible to reduce the time for finding an approximate solution for distributing computing resources of fog servers by up to 50%.

The research results can be attributed to the combined use of the simulated annealing algorithm and the genetic algorithm. The method is effective when the load on the fog layer is from 20% to 70% of the maximum possible load.

Keywords: mobile device, gateway, simulated annealing algorithm, genetic algorithm, IoT ecosystem.

References

- Kaur, G., Balyan, V., Gupta, S. H. (2025). Nature inspired optimization of IoT network for delay resistant and energy efficient applications. *Scientific Reports*, 15 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95138-z>
- 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>
- Zhurylo, O., Liashenko, O. (2024). Architecture and iot security systems based on fog computing. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 1 (27), 54–66. <https://doi.org/10.30837/itssi.2024.27.054>
- Kuchuk, H., Chumachenko, I., Marchenko, N., Kuchuk, N., Lysytsia, D. (2025). Method for calculating the number of IoT sensors in environmental monitoring systems. *Advanced Information Systems*, 9 (3), 66–72. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.08>
- Bhajantri, L. B., Gangadharaiiah, S. (2022). Heuristic-Based Resource Allocation for Internet of Things in Gateway Centric Multi-layer Fog Computing. *ICT Systems and Sustainability*, 567–579. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5221-0_54
- Liu, Q., Mo, R., Xu, X., Ma, X. (2020). Multi-objective resource allocation in mobile edge computing using PAES for Internet of Things. *Wireless Networks*, 30 (5), 3533–3545. <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02409-w>
- Yu, J., Hou, K., Zhang, H., Kostic, B., Yang, M., Nazif, H. (2025). A new energy-aware resources scheduling method for mobile internet of things using a hybrid optimisation algorithm. *International Journal of Mobile Communications*, 25 (2), 176–207. <https://doi.org/10.1504/ijmc.2025.144192>
- 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>
- Muñoz, L. A., Berná Martínez, J. V., Asensi, C. C., Pastor, D. S. (2024). RESEARCH NOTES: Design of a Distributed and Highly Scalable Fog Architecture for Heterogeneous IoT Infrastructures. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 35 (02), 195–215. <https://doi.org/10.1142/s0218194025430016>
- Lea, R., Adame, T., Berne, A., Azaiez, S. (2025). The Internet of Things, Fog, and Cloud Continuum: Integration Challenges and Opportunities for Smart Cities. *Future Internet*, 17 (7), 281. <https://doi.org/10.3390/fi17070281>
- Zhurylo, O., Liashenko, O., Avetisova, K. (2023). Hardware security overview of fog computing end devices in the internet of things. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 1 (23), 57–71. <https://doi.org/10.30837/itssi.2023.23.057>
- 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>
- Rezanov, B., Kuchuk, H. (2023). Model of elemental data flow distribution in the internet of things supporting fog platform. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 3 (25), 88–97. <https://doi.org/10.30837/itssi.2023.25.088>
- 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>
- Lee, B. M. (2025). Efficient Resource Management for Massive MIMO in High-Density Massive IoT Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 24 (3), 1963–1980. <https://doi.org/10.1109/tmc.2024.3486712>
- Kuchuk, H., Mozhaiev, O., Tiulieniev, S., Mozhaiev, M., Kuchuk, N., Lubentsov, A. et al. (2025). Devising a method for energy-efficient control over a data transmission process across the mobile high-density internet of things. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (4 (136)), 46–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.336111>
- Sandanasamy, A., Charles, P. J. (2025). Dynamic load balancing through TOPSIS based optimal server selection and resource allocation in SDN IoT network. *OPSEARCH*. <https://doi.org/10.1007/s12597-025-00985-z>
- Shamsa, Z., Rezaee, A., Adabi, S., Rahimabadi, A. M., Rahmani, A. M. (2024). A distributed load balancing method for IoT/Fog/Cloud environments with volatile resource support. *Cluster Computing*, 27 (4), 4281–4320. <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04403-9>
- Shuaib, M., Bhatia, S., Alam, S., Masih, R. K., Alqahtani, N., Bashsheer, S., Alam, M. S. (2023). An Optimized, Dynamic, and Efficient Load-Balancing Framework for Resource Management in the Internet of Things (IoT) Environment. *Electronics*, 12 (5), 1104. <https://doi.org/10.3390/electronics12051104>
- 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>
- Kanbar, A. B., Faraj, K. (2022). Region aware dynamic task scheduling and resource virtualization for load balancing in IoT-fog multi-cloud environment. *Future Generation Computer Systems*, 137, 70–86. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.06.005>
- Chiang, W.-K., Chih, Y.-H. (2025). A pareto-optimal heuristic algorithm to refactor IMS core for cloud-native NFV. *Cluster Computing*, 28 (8). <https://doi.org/10.1007/s10586-025-05177-4>
- Ritter, F. (2023). Technical note: A procedure to clean, decompose, and aggregate time series. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27 (2), 349–361. <https://doi.org/10.5194/hess-27-349-2023>
- Hu, C., Sun, Z., Li, C., Zhang, Y., Xing, C. (2023). Survey of Time Series Data Generation in IoT. *Sensors*, 23 (15), 6976. <https://doi.org/10.3390/s23156976>
- Sajjad, F., Rashid, M., Zafar, A., Zafar, K., Fida, B., Arshad, A. et al. (2023). An efficient hybrid approach for optimization using simulated

annealing and grasshopper algorithm for IoT applications. Discover Internet of Things, 3 (1). <https://doi.org/10.1007/s43926-023-00036-3>

26. Seyedi, B., Postolache, O. (2025). Securing IoT Communications via Anomaly Traffic Detection: Synergy of Genetic Algorithm and Ensemble Method. *Sensors*, 25 (13), 4098. <https://doi.org/10.3390/s25134098>
27. Gupta, N., Sharma, V. (2023). Context Aware Hybrid Network Architecture for Iot with Machine Learning Based Intelligent Gateway. *SN Computer Science*, 4 (3). <https://doi.org/10.1007/s42979-023-01736-x>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.345073

DEVELOPMENT OF A FORECASTING MODEL FOR OPTIMIZING ENERGY CONSUMPTION AT COAL ENTERPRISES (p. 26–35)

Shynar Telbayeva

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6208-4113>

Leonid Avdeyev

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4720-5823>

Vladimir Kaverin

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2021-7445>

Dinara Zhumagulova

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8830-7696>

The study object is daily data on electricity consumption of one of the coal mines in the Karaganda basin for 2024. This article solves the problem of the lack of accurate tools that can predict complex and variable modes of energy consumption in a coal mine and thereby ensure more efficient management of energy-intensive installations.

This article presents a comparative analysis of three electricity demand forecasting models using data from a coal mine in the Karaganda basin for 2024. The study explores the effectiveness of both classical approaches (seasonal ARIMA model and simple exponential smoothing) and an LSTM neural network model. To handle non-stationary data, the first difference method was applied, allowing the time series to be stationary. The forecast was generated for 7 days in advance. A comparative analysis of the models' accuracy was conducted using the MAPE metric on both the training and test sets. The study found that the LSTM model demonstrated the best results with a MAPE of 5.37% on the test set demonstrating its superior ability to capture complex data dynamics compared to ARIMA and simple exponential smoothing.

The developed predictive LSTM model can be effectively used in automated energy monitoring and management systems, providing accurate short-term load forecasts for coal mines and other mining and metallurgical enterprises with complex and volatile energy structures, provided the initial data is highly reliable and complete.

Keywords: power consumption mode, coal mine, time series, ARIMA, exponential smoothing, neural network model, LSTM, MAPE, test sample, stationarity.

References

1. Kazakhstan Electric Power Industry Key Factors. Available at: <https://www.kegoc.kz/en/electric-power/elektroenergetika-kazakhstana/>
2. Hu, H.-J., Sun, X., Zeng, B., Gong, D.-W., Zhang, Y. (2024). Multi-time-scale interval optimal dispatch of coal mine integrated energy system considering source-load uncertainty. *Control and Decision (Kongzhi yu Juece)*, 39 (3), 827–835. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1507>
3. Zeng, Z., Li, M. (2021). Bayesian median autoregression for robust time series forecasting. *International Journal of Forecasting*, 37 (2), 1000–1010. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2020.11.002>
4. Xiao, H., Wang, B., Zhou, H., Hu, W., Liu, G.-Ping. (2026). Digital twin-empowered power consumption prediction for energy-intensive aluminum annealing furnaces. *Expert Systems with Applications*, 296, 129079. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.129079>
5. Kaytez, F., Taplamacioglu, M. C., Cam, E., Hardalac, F. (2015). Forecasting electricity consumption: A comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 67, 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.036>
6. De Silva, S. N., Mishra, B. K., Sayers, W., Loukil, Z. (2025). Predicting Long-Term Electricity Consumption Using Time Series Data: Use Case of the UK Electricity Data. *Intelligent Systems with Applications in Communications, Computing and IoT*, 37–58. https://doi.org/10.1007/978-3-031-92614-3_3
7. El-Azab, H.-A. I., Swief, R. A., El-Amari, N. H., Temraz, H. K. (2025). Seasonal forecasting of the hourly electricity demand applying machine and deep learning algorithms impact analysis of different factors. *Scientific Reports*, 15 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91878-0>
8. Telbayeva, S., Nurmaganbetova, G., Avdeyev, L., Kaverin, V., Is-senov, S., Janiszewski, D. et al. (2024). Development of mathematical models of power consumption at coal plants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (8 (131)), 22–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313932>
9. Zhou, S., Ni, S., Han, Y., Dong, Z., Lai, C. S. (2025). Adaptive electricity consumption forecasting approach for universal environments. *Scientific Reports*, 15 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10147-2>
10. Bui, T. H., Lee, K. (2025). Forecasting annual electricity consumption in Vietnam using radial basis function neural network. *Energy*, 334, 137762. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137762>
11. Tolentino, J. A. (2025). Forecasting Electricity Consumption Using ARIMA Model. *Smart Trends in Computing and Communications*, 41–51. https://doi.org/10.1007/978-981-96-7517-3_4
12. Al-Dahhan, I. A. H., Ashour, M. A. H. (2025). A Hybrid ARIMA-ANN Model for Enhanced Electricity Consumption Forecasting in Bahrain. Integrating Big Data and IoT for Enhanced Decision-Making Systems in Business, 399–407. https://doi.org/10.1007/978-3-031-97609-4_34
13. ARIMA model. Available at: <https://docs.exponenta.ru/econ/arma-model.html>
14. Exponential smoothing. Available at: https://help.fsight.ru/ru/mergedProjects/lib/02_time_series_analysis/uimodelling_exps-mooth.htm
15. LSTM – long-term short-term memory networks. Available at: <https://habr.com/ru/companies/wunderfund/articles/331310/>
16. Fundamentals of forecasting theory. Available at: <https://openforecast.org/ru/etextbook/about/>
17. Methods and formulas for Augmented Dickey-Fuller Test. Available at: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statisti->

cal-modeling/time-series/how-to/augmented-dickey-fuller-test/methods-and-formulas/methods-and-formulas/?utm_source=chatgpt.com

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342750

DEVELOPMENT HYBRID OA-RG WITH MULTI-ROW TIME-AGGREGATED COVER CUTS FOR SOLVING MINLP IN COFFEE PLANTATION MAINTENANCE (p. 36–48)

Eko Hariyanto

Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3527-5023>

Poltak Sihombing

Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5348-4537>

Erna Budhiarti Nababan

Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6368-5997>

Sawaluddin

Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2188-5162>

The object of this research is the NP-hard combinatorial optimization problem in the allocation of limited resources for the maintenance of smallholder coffee plantations. In this study, a hybrid method of outer Approximation (OA) and reduced gradient (RG), enhanced by multi-row time-aggregated cover cuts (MTACC) is proposed to address the computational time efficiency problem in mixed-integer nonlinear programming (MINLP)-based combinatorial optimization problems. The testing was conducted using plantation land data from the Rahmat Kinara Coffee Farmers Association, which includes 538 land blocks with a total area of 825.5 hectares. Based on the numerical results obtained, it shows a reduction in the number of iterations by up to 38.83% and an increase in the speed of convergence time by up to 12.84%. The n_w feature in MTACC specifically controls the length of the time window to form multi-row covering slices that are suitable for the characteristics of the constraints, which affects the master and RG subproblems in overcoming the computational load. The evaluation results for testing parameters $n_w = 7$ and $n_w = 14$ show an increased contribution to convergence time of up to 10.1% by reducing the average master MILP time by 6.16%. Evaluation of the area under curve (AUC) metric confirms that MTACC is more stable in controlling optimality gaps across global iterations based on AUC (abs) assessment, which decreased by 21.6%; AUC per iteration decreased by 19.9%, and normalized AUC also decreased by 18.6%.

The results obtained can be effectively applied in small to large-scale coffee plantations, especially in decision support systems on low-power computing devices for production sustainability.

Keywords: outer approximation, reduced gradient, MTACC, MINLP, plantation maintenance scheduling, limited resources optimization, smallholder coffee plantations, combinatorial optimization, time window constraints, decision support systems.

References

- Tharatipyakul, A., Pongnumkul, S., Riansumrit, N., Kingchan, S., Pongnumkul, S. (2022). Blockchain-Based Traceability System From the Users' Perspective: A Case Study of Thai Coffee Supply Chain. *IEEE Access*, 10, 98783–98802. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3206860>
- Wulandari, S., Djufry, F., Villano, R. (2022). Coping Strategies of Smallholder Coffee Farmers under the COVID-19 Impact in Indonesia. *Agriculture*, 12 (5), 690. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050690>
- Parmawati, R., Risvita, W., Hakim, L., Rahmawati, N. O., Gunawan, F. K., Ashari, F. M., Haqqi, S. S. (2023). Sustainability Index of Robusta Coffee Plantation (Case Study: Wagir District Smallholder Coffee Plantation in Malang, Indonesia). *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 18 (2), 279–288. <https://doi.org/10.18280/ij dne.180205>
- Hartoyo, A. P. P., Hutagalung, L., Kulsum, F., Sunkar, A., Herliyana, E. N., Hidayati, S. (2023). Species composition, structure, and management in gayo coffee-based agroforestry system. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 13 (1), 37–48. <https://doi.org/10.29244/jpsl.13.1.37-48>
- Jiang, Y., Chen, L., Fang, Y. (2018). Integrated Harvest and Distribution Scheduling with Time Windows of Perishable Agri-Products in One-Belt and One-Road Context. *Sustainability*, 10 (5), 1570. <https://doi.org/10.3390/su10051570>
- Hajirad, I., Ahmadaali, K., Liaghat, A. (2025). Crop yield and water productivity modeling using nonlinear growth functions. *Scientific Reports*, 15 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16096-0>
- Abd El Baki, H. M., Fujimaki, H., Tokumoto, I., Saito, T. (2024). Optimization of irrigation scheduling using crop–water simulation, water pricing, and quantitative weather forecasts. *Frontiers in Agronomy*, 6. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1376231>
- Baghizadeh, K., Cheikhrouhou, N., Govindan, K., Ziyarati, M. (2021). Sustainable agriculture supply chain network design considering water-energy-food nexus using queuing system: A hybrid robust possibilistic programming. *Natural Resource Modeling*, 35 (1). <https://doi.org/10.1111/nrm.12337>
- Baihaqi, A., Sofiana, U., Usman, M., Bagio, B. (2022). Risk analysis of arabica coffee supply chain in Aceh Tengah regency, Aceh Province, Indonesia. *Coffee Science*, 16, 1–9. <https://doi.org/10.25186/v16i.1984>
- Kronqvist, J., Bernal Neira, D. E., Grossmann, I. E. (2025). 50 years of mixed-integer nonlinear and disjunctive programming. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2025.07.016>
- Patty, S., Das, R., Mandal, D., Roy, P. K. (2025). Self-adaptive multi-population quadratic approximation guided jaya optimization applied to economic load dispatch problems with or without valve-point effects. *Results in Control and Optimization*, 19, 100543. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2025.100543>
- Liñán, D. A., Ricardez-Sandoval, L. A. (2025). Trends and perspectives in deterministic MINLP optimization for integrated planning, scheduling, control, and design of chemical processes. *Reviews in Chemical Engineering*, 41 (5), 451–472. <https://doi.org/10.1515/revce-2024-0064>
- De Mauri, M., Gillis, J., Swevers, J., Pipeleers, G. (2020). A proximal-point outer approximation algorithm. *Computational Optimization and Applications*, 77 (3), 755–777. <https://doi.org/10.1007/s10589-020-00216-9>
- Liu, Z. E., Long, W., Chen, Z., Littlefield, J., Jing, L., Ren, B. et al. (2024). A novel optimization framework for natural gas transportation

- pipeline networks based on deep reinforcement learning. *Energy and AI*, 18, 100434. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100434>
15. Wu, O., Muts, P., Nowak, I., Hendrix, E. M. T. (2024). On the use of overlapping convex hull relaxations to solve nonconvex MINLPs. *Journal of Global Optimization*, 91 (2), 415–436. <https://doi.org/10.1007/s10898-024-01376-2>
 16. Kohar, A., Jakhar, S. K., Agarwal, Y. K. (2023). Strong cutting planes for the capacitated multi-pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 176, 102806. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2023.102806>
 17. Melo, W., Fampa, M., Raupp, F. (2020). Two linear approximation algorithms for convex mixed integer nonlinear programming. *Annals of Operations Research*, 316 (2), 1471–1491. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03722-5>
 18. Javaloyes-Antón, J., Kronqvist, J., Caballero, J. A. (2022). Simulation-based optimization of distillation processes using an extended cutting plane algorithm. *Computers & Chemical Engineering*, 159, 107655. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107655>
 19. Muts, P., Nowak, I., Hendrix, E. M. T. (2020). The decomposition-based outer approximation algorithm for convex mixed-integer nonlinear programming. *Journal of Global Optimization*, 77 (1), 75–96. <https://doi.org/10.1007/s10898-020-00888-x>
 20. Deza, A., Khalil, E. B. (2023). Machine Learning for Cutting Planes in Integer Programming: A Survey. *Proceedings of the Thirty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 6592–6600. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2023/739>
 21. Kronqvist, J., Misener, R. (2020). A disjunctive cut strengthening technique for convex MINLP. *Optimization and Engineering*, 22 (3), 1315–1345. <https://doi.org/10.1007/s11081-020-09551-6>
 22. Bestuzheva, K., Gleixner, A., Vigerske, S. (2023). A computational study of perspective cuts. *Mathematical Programming Computation*, 15 (4), 703–731. <https://doi.org/10.1007/s12532-023-00246-4>
 23. Lundell, A., Kronqvist, J., Westerlund, T. (2022). The supporting hyperplane optimization toolkit for convex MINLP. *Journal of Global Optimization*, 84 (1), 1–41. <https://doi.org/10.1007/s10898-022-01128-0>
 24. Vo, T., Baiou, M., Nguyen, V. H., Weng, P. (2025). Learning to Cut Generation in Branch-and-Cut Algorithms for Combinatorial Optimization. *ACM Transactions on Evolutionary Learning and Optimization*, 5 (3), 1–27. <https://doi.org/10.1145/3728371>
 25. Peng, Z., Cao, K., Furman, K. C., Li, C., Grossmann, I. E., Neira, D. E. B. (2024). A Convexification-based Outer-approximation Method for Convex and Nonconvex MINLP. *34th European Symposium on Computer Aided Process Engineering / 15th International Symposium on Process Systems Engineering*, 3211–3216. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-28824-1.50536-6>
 26. Lundell, A., Kronqvist, J. (2021). Polyhedral approximation strategies for nonconvex mixed-integer nonlinear programming in SHOT. *Journal of Global Optimization*, 82 (4), 863–896. <https://doi.org/10.1007/s10898-021-01006-1>
 27. Bodur, M., Del Pia, A., Dey, S. S., Molinaro, M., Pokutta, S. (2017). Aggregation-based cutting-planes for packing and covering integer programs. *Mathematical Programming*, 171 (1-2), 331–359. <https://doi.org/10.1007/s10107-017-1192-x>
 28. Zhang, Y., Chang, R., Omrany, H., Zuo, J., Burry, J., Gu, N. (2025). Policy-gradient scheduling optimisation under multi-skill constraints: A comparative study on computational algorithms. *Journal of Building Design and Environment*. <https://doi.org/10.70401/jbde.2025.0017>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.344556

РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ СКЛАДНИХ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРО-НЕЧІТКИХ ЕКСПЕРТНИХ СИСТЕМ (с. 6–14)**А. В. Шишацький, Г. А. Плехова, І. В. Шостак, О. І. Феоктистова, А. О. Веретнов, С. В. Пронін, О. П. Шапошнікова, Г. С. Степанов, Н. В. Гнатюк, В. Д. Кайдалов**

Об'єктом дослідження є складні організаційно-технічні системи. Проблема, яка вирішується в дослідженні, є підвищення оперативності оцінки процесу функціонування складних організаційно-технічних систем (ОТС) при збереженні заданого рівня достовірності. Проведено розробку методу оцінки складних організаційно-технічних систем з використанням нейро-нечітких експертних систем. Оригінальність дослідження полягає:

- у повному охопленні критичних подій, що відбуваються при функціонуванні ОТС. Зазначене досягається за рахунок використання теорії Демпстера-Шафера, чим досягається повнота оцінки усього спектру критичних подій в ОТС;
 - у комплексному описі процесу функціонування ОТС. Зазначене дозволяє підвищити точність моделювання ОТС для прийняття послідовних управлінських рішень;
 - у можливості провести первинне налаштування баз знань ОТС за допомогою удосконаленого генетичного алгоритму. Зазначене дозволяє зменшити обчислювальну складність при подальшому формуванні бази знань ОТС за рахунок скорочення метрики формування правил в базі знань ОТС;
 - у можливості моделювати характер розвитку нетипових подій в ОТС за рахунок використання часових рядів, чим досягається можливість вироблення превентивних заходів по мінімізації впливу зазначених подій на процес функціонування ОТС;
 - в поступовому скороченні метрики формування бази знань про стани ОТС, за рахунок навчання агентів удосконаленого генетичного алгоритму. Зазначене дозволяє зменшити кількість обчислювальних ресурсів підсистеми оцінки стану функціонування ОТС;
- Запропонований метод забезпечує підвищення оперативності в середньому на 23%, при забезпеченні високої збіжності отриманих результатів на рівні 93.17%, що підтверджується результатами чисельного експерименту.

Ключові слова: надійність технічних систем, складні технічні системи, оперативність, комплексна оцінка, обчислювальні ресурси.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.344553

РОЗРОБКА МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИМИ РЕСУРСАМИ ТУМАННОГО ШАРУ МОБІЛЬНОГО ВИСОКОШІДЬНОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (с. 15–25)**Г. А. Кучук, О. О. Можаяєв, С. А. Тюленев, М. О. Можаяєв, Н. Г. Кучук, П. М. Хоробрих, Ю. В. Гнусов, Ю. П. Горелов, В. А. Світличний, О. С. Білик**

Об'єктом дослідження є процес керування розподілом обчислювального ресурсу туманного шару мобільного високошідьного Інтернету речей. Вирішувалась проблема зменшення дисбалансу завантаження туманних серверів за рахунок розробки методу керування обчислювальними ресурсами туманного шару при обробці інформаційних потоків. Інформаційні потоки формуються інтелектуальними шлюзами мобільного високошідьного Інтернету речей, які приймають дані з граничного шару. В процесі проведення досліджень розроблена математична модель процесу керування обчислювальними ресурсами туманного шару. Головна відмінність даної моделі від існуючих – блочна ієрархічна структура по базових рівнях прийняття рішень при керуванні обчислювальними ресурсами. При розробці моделі використаний принцип декомпозиції процесу по суміжних часових інтервалах. Його застосування дозволило провести локальну оптимізацію процесу керування обчислювальними ресурсами на коротких часових інтервалах. Дана математична модель дозволила розробити метод керування обчислювальними ресурсами туманного шару. Головна відмінність даного методу від існуючих – оптимізація процесу проводиться за показником площі відносного відхилення від збалансованого завантаження на часовому інтервалі, що досліджується. Також використовується двоетапний алгоритм розподілу завдань вільних туманних пристроїв по серверах туманного шару. Це дозволило скоротити час пошуку наближеного рішення щодо розподілу обчислювальних ресурсів туманних серверів до 50%. Отримані результати дослідження можна пояснити сумісним застосуванням алгоритму імітації відпаду та генетичного алгоритму. Метод є ефективним при навантаженні на туманний шар від 20 до 70% максимально можливого навантаження.

Ключові слова: мобільний пристрій, шлюз, алгоритм імітації відпаду, генетичний алгоритм, екосистема IoT.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.345073

РОЗРОБКА ПРОГНОЗУЮЧОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА ВУГІЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ (с. 26–35)**Shynar Telbayeva, Leonid Avdeyev, Vladimir Kaverin, Dinara Zhumagulova**

Об'єктом дослідження є щоденні дані про споживання електроенергії однією з вугільних шахт Карагандинського басейну за 2024 рік. Вирішується проблема відсутності точних інструментів, які можуть прогнозувати складні та змінні режими споживання енергії у вугільній шахті та тим самим забезпечувати більш ефективне управління енергоємними установками.

Представлено порівняльний аналіз трьох моделей прогнозування попиту на електроенергію з використанням даних з вугільної шахти Карагандинського басейну за 2024 рік. В роботі досліджується ефективність як класичних підходів (сезонна модель ARIMA та просте експоненціальне згладжування), так і моделі нейронної мережі LSTM. Для обробки нестационарних даних було застосовано метод першої різниці, що дозволило зробити часові ряди стаціонарними. Прогноз було згенеровано на 7 днів вперед. Порівняльний аналіз точності моделей було проведено з використанням метрики MAPE як на навчальному, так і на тестовому наборах.

Дослідження показало, що модель LSTM продемонструвала найкращі результати з MAPE 5,37% на тестовому наборі, демонструючи її кращу здатність фіксувати динаміку складних даних порівняно з ARIMA та простим експоненціальним згладжуванням.

Розроблена прогнозна модель LSTM може бути ефективно використана в автоматизованих системах моніторингу та управління енергією, забезпечуючи точні короткострокові прогнози навантаження для вугільних шахт та інших гірничодобувних і металургійних підприємств зі складними та нестабільними енергетичними структурами, за умови високої надійності та повноти вихідних даних.

Ключові слова: режим споживання енергії, вугільна шахта, часові ряди, ARIMA, експоненціальне згладжування, нейронна мережева модель, LSTM, MAPE, тестова вибірка, стаціонарність.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342750

**РОЗРОБКА ГІБРИДНОЇ OA-RG З БАГАТОРЯДНИМИ АГРЕГОВАНИМИ ЗА ЧАСОМ ПОКРИВНИМИ РІЗАМИ
ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ MINLP ПРИ ОБСЛУГОВУВАННІ КАВОВИХ ПЛАНТАЦІЙ (с. 36–48)**

Eko Hariyanto, Poltak Sihombing, Erna Budhiarti Nababan, Sawaluddin

Об'єктом дослідження є NP-складна комбінаторна оптимізаційна задача розподілу обмежених ресурсів для утримання дрібних кавових плантацій. У цьому дослідженні пропонується гібридний метод зовнішнього наближення (OA) та зменшеного градієнта (RG), удосконалений багаторядковим агрегованим за часом покривним зрізом (MTACC), для вирішення проблеми ефективності обчислювального часу в комбінаторних оптимізаційних задачах на основі змішаного цілочисельного нелінійного програмування (MINLP). Тестування проводилося з використанням даних про плантації Асоціації кавових фермерів Рахмата Кінара, яка включає 538 земельних ділянок загальною площею 825,5 гектарів. На основі отриманих числових результатів показано зменшення кількості ітерацій до 38,83% та збільшення швидкості збіжності до 12,84%. Функція n_w у MTACC спеціально контролює тривалість часового вікна для формування багаторядкових покривних зрізів, які підходять для характеристик обмежень, що впливає на головну та RG-підзадачі у подоланні обчислювального навантаження. Результати оцінювання параметрів тестування $n_w = 7$ та $n_w = 14$ показують збільшення внеску в час збіжності до 10,1% за рахунок зменшення середнього часу основного MILP на 6,16%. Оцінювання метрики площі під кривою (AUC) підтверджує, що MTACC є більш стабільним у контролі розривів оптимальності в глобальних ітераціях на основі оцінки AUC, яка зменшилася на 21,6%; AUC на ітерацію зменшилася на 19,9%, а нормалізована AUC також зменшилася на 18,6%.

Отримані результати можуть бути ефективно застосовані на малих та великих кавових плантаціях, особливо в системах підтримки рішень на малопотужних обчислювальних пристроях для забезпечення сталого виробництва.

Ключові слова: зовнішнє наближення, зменшений градієнт, MTACC, MINLP, планування обслуговування плантацій, оптимізація обмежених ресурсів, дрібнофермерські кавові плантації, комбінаторна оптимізація, обмеження часових вікон, системи підтримки прийняття рішень.