DOI: 10.15587/1729-4061.2025.340603

CONSTRUCTION OF A SIMULATION MODEL FOR MANAGING LOAD ON COMPUTING NODES IN A SERVER CLUSTER BASED ON THE THEORY OF FUZZY LOGIC AND NASH EQUILIBRIUM (p. 6–17)

Yevhenii Neroznak
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5641-5473

Olexandr Trotsko
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7535-5023

Vitalii Fesokha
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6612-1970

Dmytro Balan
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6714-8718

Robert Bieliakov
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9882-3088

This study's object is the process of managing (balancing) the load on the computing nodes in a server cluster of information systems. The task addressed is to enable optimal (even) distribution of server resources within a cluster system.

A simulation model of the process that distributes the load on computing nodes of a server cluster has been built, based on an improved model of the optimal use of server resources in a cluster based on Nash equilibrium and an improved method of adaptive load balancing in cluster systems according to Nash equilibrium.

The simulation model has been constructed on the basis of fuzzy logic theory to determine the feasibility of decomposing tasks into subtasks, as well as game theory, in particular Nash equilibrium, to determine the optimal distribution of tasks/subtasks across cluster system servers for their parallel processing.

The model built makes it possible to improve the efficiency (uniformity) of server resource distribution by an average of 13% compared to the classical load management method based on Nash equilibrium, by 61% with the Round Robin method, and by 63% with the Least Connection method throughout the entire process of cluster operation. This, in turn, allows for a more than 2-fold increase in the number of processed tasks from client requests compared to the above load balancing methods.

In addition, the impact of the load balancing process on the processing time of tasks/subtasks by the cluster system servers was estimated. Based on the results of simulation modeling, it can be concluded that the application of the devised model does not exceed the total allowable processing time (no more than 315 ms) of tasks/subtasks from client requests compared to existing load balancing methods.

Keywords: simulation model, server cluster, optimization, load management, resilience.

References

1. Pro rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy vid 20 serpnia 2021 roku "Pro Stratehichnyi oboronnyi biuleten Ukrainy". Ukaz Prezydenta Ukrainy vid 17.09.2021 r. No. 473/2021. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/473/2021#Text
2. Pro rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy vid 18 chervnia 2021 roku "Pro Stratehiiu rozvytku oboronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy"/Ukaz Prezydenta Ukrainy vid 20.08.2021 r. No. 372/2021. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/372/2021#Text
3. Begam, G. S., Sangeetha, M., Shanker, N. R. (2021). Load Balancing in DCN Servers through SDN Machine Learning Algorithm. Arabian Journal for Science and Engineering, 47 (2), 1423–1434. https://doi.org/10.1007/s13369-021-05911-1
4. Klots, Y. P., Stefanovytch, K. Y., Shakhoval, Y. S., Demeshko, V. I. (2019). Dynamic traffic balance between several providers. Herald of Khmelnytskyi national university, 4 (275). 62–67. Available at: https://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/01/12-7.pdf
5. Naz, N. S., Abbas, S., Adnan, M., Abid, B., Tariq, N., Farrukh, M. (2019). Efficient Load Balancing in Cloud Computing using Multi-Layered Mamdani Fuzzy Inference Expert System. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 10 (3). https://doi.org/10.14569/ijacsa.2019.0100373
6. Chen, L., Wu, K., Li, Y. (2014). A Load Balancing Algorithm Based on Maximum Entropy Methods in Homogeneous Clusters. Entropy, 16 (11), 5677–5697. https://doi.org/10.3390/e16115677
7. Priya, S. S., Rajendran, Dr. T. (2025). Enhanced Weighted Round Robin: A New Paradigm in Cloud Load Balancing. Indian Journal Of Science And Technology, 18 (15), 1220–1228. https://doi.org/10.17485/ijst/v18i15.3976
8. Dash, Y., Dalei, R. K., Dhal, K. (2025). Modified Genetic Algorithms (GA) for Load balancing in Cloud Computing. Journal of Information Systems Engineering and Management, 10 (54s), 1–8. https://doi.org/10.52783/jisem.v10i54s.11028
9. Matiwure, T., Ndlovu, A. (2025). Enhancing throttled load balancing algorithm with machine learning for dynamic resource allocation in cloud computing environments. International Journal of Computer Science and Mobile Computing, 14 (6), 20–25. https://doi.org/10.47760/ijcsmc.2025.v14i06.003
10. Fesokha, V. V., Neroznak, E. I., Sova, O. Ya. (2023). An improved model of optimal use of resources of a cluster system of military assignment based on nash equilibrium. Collection of Scientific Works of the Military Institute of Kyiv National Taras Shevchenko University, 79, 159–171. https://doi.org/10.17721/2519-481x/2023/79-15
11. Fesokha, V., Neroznak, Y., Sova, O., Nesterov, O. (2023). Method of adaptive load balancing in cluster systems for military purposes based on Nash equilibrium. Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen NUOU imeni Ivana Cherniakhovskoho, 3 (76), 101–110. https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-3-76/101-110
12. Sivanandam, S. N., Sumathi, S., Deepa, S. N. (2007). Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-35781-0
13. MATLAB. The MathWorks, Inc. Available at: https://www.mathworks.com/help/matlab/

14. Welcome to Nashpy's documentation! Nashpy. Available at: https://nashpy.readthedocs.io/en/stable/
15. Campesato, O. (2020). Python 3 for Machine Learning. Mercury Learning and Information, 364. Available at: https://www.amazon.com/Python-Machine-Learning-Oswald-Campesato/dp/1683924959
16. Neroznak, Ye. I., Merkotan, D. Yu., Sova, O. Ya. (2021). Metody ta alhorytmy balansuvannia navantazhennia v klasternykh systemakh na osnovi elementiv shtuchnoho intelektu. Systemy i tekhnolohiyi zviazku, informatyzatsiyi ta kiberbezpeky: aktualni pytannia i tendentsiyi rozvytku: I Mizhnarodna nauk.-tekhn. konf. Kyiv, 215–217.
17. Load Balancing Algorithms and Techniques. Available at: https://kemptechnologies.com/load-balancer/load-balancing-algorithms-techniques

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341940

IMPLEMENTATION OF HYBRID DEEP LEARNING CNN-LSTM IN COST RECOVERY PREDICTION IN THE CONTEXT OF OPTIMIZING LOW-COST CARRIER STRATEGIC MANAGEMENT AT PT LION MENTARI AIRLINES (p. 18–25)

Daniel Dewantoro Rumani
Indonesia Civil Pilot Academy, Jawa Timur, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0400-5290

Willy Arafah
Universitas Trisakti, Jakarta, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4598-5790

Kusnadi
Sekolah Tinggi Penerbangan Aviasi,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6227-4304

The object of this research is the cost recovery prediction model of low-cost airlines. The challenge faced is the complexity of the airline's financial and operational patterns, which encompass spatial and temporal interactions, making it difficult for a single prediction model to produce accurate and stable estimates. This challenge directly impacts management's ability to develop effective strategies, including fare setting, fuel cost control, and flight route planning. To address this issue, this research implements a hybrid deep learning approach, CNN-LSTM. The CNN is used to extract spatial features from multivariate data, while the LSTM captures long-term temporal dependencies with a complex memory update mechanism. The integration of these two models allows for richer data pattern processing than a single model, resulting in more accurate predictions that align closely with actual conditions. The research interpretation indicates that the hybrid model is able to leverage the strengths of each component: CNN in extracting local features and LSTM in understanding temporal dynamics. This is reflected in the prediction results, which show a smaller deviation from the actual data compared to either CNN or LSTM alone. Based on the test results on cost recovery data for 14 periods, the three models CNN, LSTM, and CNN-LSTM hybrid showed high and stable accuracy in following the actual value pattern. From the first to the fourth period, all models produced results very close to the actual value, with an average difference below 0.02. For example, in the fourth period, the actual value of 0.88 was well predicted by CNN (0.91), LSTM (0.886), and CNN-LSTM (0.876). However, in the sixth to ninth periods, there was a slight decrease in accuracy as the actual value decreased, especially in the ninth period when the value of 0.74 was only predicted by 0.731 by CNN, 0.74 by LSTM, and 0.732 by the hybrid model. The implementation of the CNN-LSTM hybrid not only improves the accuracy and reliability of cost recovery predictions but also provides strategic value for PT Lion Mentari Airlines management, supporting more efficient and optimal decision-making to enhance the low-cost carrier's competitiveness.

Keywords: hybrid, CNN-LSTM, recovery prediction, low cost carrier, deep learning, optimization.

References

1. Ding, W., Li, M. Z., Itoh, E. (2025). Flight Connection Planning for Low-Cost Carriers Under Passenger Demand Uncertainty. Aerospace, 12 (7), 574. https://doi.org/10.3390/aerospace12070574
2. Pivac, J., Štimac, I., Bartulović, D., Lonjak, I. (2025). Planning the Airport Terminal Facilities Based on Traffic Demand Forecast and Dominant Share of Airline Business Model: Case Study of Pula Airport. Applied Sciences, 15 (5), 2547. https://doi.org/10.3390/app15052547
3. Hassan, T. H., Salem, A. E. (2021). Impact of Service Quality of Low-Cost Carriers on Airline Image and Consumers' Satisfaction and Loyalty during the COVID-19 Outbreak. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19 (1), 83. https://doi.org/10.3390/ijerph19010083
4. Khan, N. T., Aslam, J., Rauf, A. A., Kim, Y. B. (2022). The Case of South Korean Airlines-Within-Airlines Model: Helping Full-Service Carriers Challenge Low-Cost Carriers. Sustainability, 14 (6), 3468. https://doi.org/10.3390/su14063468
5. Kabashkin, I., Perekrestov, V., Tyncherov, T., Shoshin, L., Susanin, V. (2024). Framework for Integration of Health Monitoring Systems in Life Cycle Management for Aviation Sustainability and Cost Efficiency. Sustainability, 16 (14), 6154. https://doi.org/10.3390/su16146154
6. Markopoulos, E., Hesse, F. J. F. (2021). A Business Transformation Model for Legacy Carriers as a Response to the Rise of Low-Cost Carriers. Advances in Creativity, Innovation, Entrepreneurship and Communication of Design, 376–385. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80094-9_45
7. Bachwich, A. R., Wittman, M. D. (2017). The emergence and effects of the ultra-low cost carrier (ULCC) business model in the U.S. airline industry. Journal of Air Transport Management, 62, 155–164. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2017.03.012
8. Albers, S., Daft, J., Stabenow, S., Rundshagen, V. (2020). The long-haul low-cost airline business model: A disruptive innovation perspective. Journal of Air Transport Management, 89, 101878. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101878
9. Zhou, J., Shan, Y., Liu, J., Xu, Y., Zheng, Y. (2020). Degradation Tendency Prediction for Pumped Storage Unit Based on Integrated Degradation Index Construction and Hybrid CNN-LSTM Model. Sensors, 20 (15), 4277. https://doi.org/10.3390/s20154277
10. Murshed, R. U., Ashraf, Z. B., Hridhon, A. H., Munasinghe, K., Jamalipour, A., Hossain, Md. F. (2023). A CNN-LSTM-Based Fusion Separation Deep Neural Network for 6G Ultra-Massive MIMO Hybrid Beamforming. IEEE Access, 11, 38614–38630. https://doi.org/10.1109/access.2023.3266355
11. Chen, Y., Sun, J., Lin, Y., Gui, G., Sari, H. (2022). Hybrid N-Inception-LSTM-Based Aircraft Coordinate Prediction Method for Secure Air Traffic. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 23 (3), 2773–2783. https://doi.org/10.1109/tits.2021.3095129
12. Gozuoglu, A., Ozgonenel, O., Gezegin, C. (2024). CNN-LSTM based deep learning application on Jetson Nano: Estimating electrical energy consumption for future smart homes. Internet of Things, 26, 101148. https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101148
13. Zhou, H., Razavi, S. (2025). Fusing Unstructured Text and Time Series Demand and Economic Data for Demand Prediction in Air Cargo Transportation. Data Science for Transportation, 7 (3). https://doi.org/10.1007/s42421-025-00130-8

14. Woyano, F., Park, S., Blagovest Iordanov, V., Lee, S. (2023). A Hybrid CNN-LSTM-Based Approach for Pedestrian Dead Reckoning Using Multi-Sensor-Equipped Backpack. Electronics, 12 (13), 2957. https://doi.org/10.3390/electronics12132957
15. Antoni, A., Arfah, M., Fachrizal, F., Nugroho, O. (2024). Developing a model of association rules with machine learning in determining user habits on social media. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (2 (129)), 55–61. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305116
16. Lubis, A. R., Prayudani, S., Lubis, M., Al-Khowarizmi. (2019). Analysis of the Markov Chain Approach to Detect Blood Sugar Level. Journal of Physics: Conference Series, 1361 (1), 012052. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1361/1/012052
17. Demiss, B. A., Elsaigh, W. A. (2024). Application of novel hybrid deep learning architectures combining Convolutional Neural Networks (CNN) and Recurrent Neural Networks (RNN): construction duration estimates prediction considering preconstruction uncertainties. Engineering Research Express, 6 (3), 032102. https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad6ca7
18. Mas-Pujol, S., Salamí, E., Pastor, E. (2022). RNN-CNN Hybrid Model to Predict C-ATC CAPACITY Regulations for En-Route Traffic. Aerospace, 9 (2), 93. https://doi.org/10.3390/aerospace9020093
19. Zhao, Z., Yuan, J., Chen, L. (2024). Air Traffic Flow Management Delay Prediction Based on Feature Extraction and an Optimization Algorithm. Aerospace, 11 (2), 168. https://doi.org/10.3390/aerospace11020168
20. Shukla, S. K., Sushil, Sharma, M. K. (2019). Managerial Paradox Toward Flexibility: Emergent Views Using Thematic Analysis of Literature. Global Journal of Flexible Systems Management, 20 (4), 349–370. https://doi.org/10.1007/s40171-019-00220-x
21. Garcia, J., Rios-Colque, L., Peña, A., Rojas, L. (2025). Condition Monitoring and Predictive Maintenance in Industrial Equipment: An NLP-Assisted Review of Signal Processing, Hybrid Models, and Implementation Challenges. Applied Sciences, 15 (10), 5465. https://doi.org/10.3390/app15105465
22. Min, J., Gan, X., Zhao, G., Yang, B., Wang, J. (2025). Research on Aircraft Trajectory Prediction Method Based on CPO-Optimized CNN-LSTM-Attention Network. https://doi.org/10.20944/preprints202507.1391.v1

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342159

OPTIMIZATION OF MULTI-AIRCRAFT LANDING SCHEDULING BASED ON MACHINE LEARNING WITH QUANTUM ANNEALING UNDER UNCERTAINTY CONDITIONS ON SINGLE AND MULTIPLE RUNS (p. 26–35)

Darmeli Nasution
Universitas Panca Budi Medan, Medan, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1144-4415

Donni Nasution
Universitas Prima Indonesia, Sumatera Utara, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3165-9447

Okvi Nugroho
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6156-3338

Mahardika Abdi Prawira Tanjung
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5429-5455

The object of this study is multi-aircraft landing scheduling on single and multiple runways, which is an important aspect of modern air traffic management systems. The main problems solved in this research are the complexity of scheduling optimization due to limited runway capacity, the need to maintain a safe distance between aircraft, and the uncertainty of estimated time of arrival (ETA) which is often influenced by external factors such as weather and air traffic density. To overcome these challenges, this research proposes a hybrid approach between Long short-term memory-gradient boosting with the quantum annealing method. the results show that this approach is able to significantly improve the performance of the scheduling system, with an accuracy of 0.93, a precision of 0.91, a recall of 0.90, and an F1 score of 0.91. These values are higher than the model without quantum annealing, which only achieved an accuracy of 0.87, a precision of 0.85, a recall of 0.83, and an F1 score of 0.84. This improvement can be explained by the ability of LSTM-gradient boosting to predict ETA deviation more accurately, as well as the effectiveness of quantum annealing in solving the quadratic unconstrained binary optimization (QUBO) formulation efficiently. The unique feature of this research lies in the application of a hybrid model that combines the power of machine learning and quantum computing, achieving a balance between predictive accuracy and optimization efficiency. These research findings can be applied to air traffic scheduling systems at airports with single or multiple runways. Their implementation has the potential to improve operational efficiency, reduce delays, and enhance flight safety through more precise and adaptive landing time management.

Keywords: aircraft landing scheduling, LSTM-gradient, quantum annealing, machine learning, optimization, ETA prediction.

References

1. Liu, J., Wang, N. (2025). Simulation-Based Two-Stage Scheduling Optimization Method for Carrier-Based Aircraft Launch and Departure Operations. Entropy, 27 (7), 662. https://doi.org/10.3390/e27070662
2. Yuan, P., Han, W., Su, X., Liu, J., Song, J. (2018). A Dynamic Scheduling Method for Carrier Aircraft Support Operation under Uncertain Conditions Based on Rolling Horizon Strategy. Applied Sciences, 8 (9), 1546. https://doi.org/10.3390/app8091546
3. Ahmed, M. S., Alam, S., Barlow, M. (2018). A Cooperative Co-Evolutionary Optimisation Model for Best-Fit Aircraft Sequence and Feasible Runway Configuration in a Multi-Runway Airport. Aerospace, 5 (3), 85. https://doi.org/10.3390/aerospace5030085
4. Rezaee, M. R., Hamid, N. A. W. A., Hussin, M., Zukarnain, Z. A. (2024). Comprehensive Review of Drones Collision Avoidance Schemes: Challenges and Open Issues. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 25 (7), 6397–6426. https://doi.org/10.1109/tits.2024.3375893
5. Israr, A., Ali, Z. A., Alkhammash, E. H., Jussila, J. J. (2022). Optimization Methods Applied to Motion Planning of Unmanned Aerial Vehicles: A Review. Drones, 6 (5), 126. https://doi.org/10.3390/drones6050126
6. Richter, D. J., Calix, R. A., Kim, K. (2024). A Review of Reinforcement Learning for Fixed-Wing Aircraft Control Tasks. IEEE Access, 12, 103026–103048. https://doi.org/10.1109/access.2024.3433540
7. Xiang, Z., Sun, H., Zhang, J. (2023). Application of Improved Q-Learning Algorithm in Dynamic Path Planning for Aircraft at Airports. IEEE Access, 11, 107892–107905. https://doi.org/10.1109/access.2023.3321196
8. Degas, A., Islam, M. R., Hurter, C., Barua, S., Rahman, H., Poudel, M. et al. (2022). A Survey on Artificial Intelligence (AI) and eXplainable AI in Air Traffic Management: Current Trends and Development with Future Research Trajectory. Applied Sciences, 12 (3), 1295. https://doi.org/10.3390/app12031295
9. Bouttier, C., Babando, O., Gadat, S., Gerchinovitz, S., Laporte, S., Nicol, F. (2017). Adaptive Simulated Annealing with Homogenization

for Aircraft Trajectory Optimization. Operations Research Proceedings 2015, 569–574. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42902-1_77
10. Pearre, B., Brown, T. X. (2012). Model-Free Trajectory Optimisation for Unmanned Aircraft Serving as Data Ferries for Widespread Sensors. Remote Sensing, 4 (10), 2971–3005. https://doi.org/10.3390/rs4102971
11. Chen, K., Wang, H. (2025). Airline-Driven Arrival Flight Rescheduling Problem Considering Passenger Satisfaction Using Improved NSGA-II. Arabian Journal for Science and Engineering. https://doi.org/10.1007/s13369-025-10400-w
12. Zhang, J., Qin, X., Zhang, M. (2025). Multi-aircraft scheduling optimization in urban environments. Applied Mathematical Modelling, 145, 116118. https://doi.org/10.1016/j.apm.2025.116118
13. Samà, M., D'Ariano, A., Palagachev, K., Gerdts, M. (2019). Integration methods for aircraft scheduling and trajectory optimization at a busy terminal manoeuvring area. OR Spectrum, 41 (3), 641–681. https://doi.org/10.1007/s00291-019-00560-1
14. Su, X.-C., Han, W., Wu, Y., Zhang, Y., Song, J.-Y. (2018). A Robust Scheduling Optimization Method for Flight Deck Operations of Aircraft Carrier With Ternary Interval Durations. IEEE Access, 6, 69918–69936. https://doi.org/10.1109/access.2018.2879503
15. Pan, W., Huang, Y., Yin, Z., Qin, L. (2023). Optimal Collaborative Scheduling of Multi-Aircraft Types for Forest Fires General Aviation Rescue. Aerospace, 10 (9), 741. https://doi.org/10.3390/aerospace10090741
16. Chauhan, S. S., Maadhav, L., Dake, A., Brillaud, G. (2026). An efficient resource utilization and scheduling strategy for in-service aircraft maintenance and operations. Computers & Operations Research, 185, 107262. https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107262
17. Kumar, P. K., Witter, J., Paul, S., Dantu, K., Chowdhury, S. (2023). Graph Learning based Decision Support for Multi-Aircraft Take-Off and Landing at Urban Air Mobility Vertiports. AIAA SCITECH 2023 Forum. https://doi.org/10.2514/6.2023-1848
18. Zhang, Y., Zhang, S., Zhang, Y., Yin, Y. (2024). A Study of TMA Aircraft Conflict-Free Routing and Operation: With Mixed Integer Linear Programming, Multi-Agent Path Finding, and Metaheuristic-Based Neighborhood Search. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 25 (10), 13976–13990. https://doi.org/10.1109/tits.2024.3385859
19. Hafidi, M., Benaddy, M., Krit, S. (2018). Review of optimization and automation of air traffic control systems. Proceedings of the Fourth International Conference on Engineering & MIS 2018, 1–7. https://doi.org/10.1145/3234698.3234708

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341456

CONSTRUCTION OF A SIMULATION MODEL OF THE WORK OF A WAREHOUSE ENTERPRISE AS A LINK IN THE LOGISTICS CHAIN (p. 36–45)

Ievgenii Lebid
National Transport University, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1794-8060

Nataliia Luzhanska
National Transport University, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1271-8728

Iryna Lebid
National Transport University, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0707-4179

Alexander Mazurenko
Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5591-1790

Iryna Mykhailenko
Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5961-3616

Svitlana Sharai
National Transport University, Kyiv, Ukraine
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6568-4990

This study investigates the process of organizing the work of a warehouse enterprise when servicing customers. The task set is to devise recommendations for planning the staffing of a warehouse enterprise, taking into account the duration of rendering services to customers.

A simulation model of the work of a warehouse enterprise when servicing customers has been built and implemented in the GPSS World simulation modeling automation package. The model involves determining the duration of warehouse service and determining the required number of personnel to enable the work of the business entity by areas of activity.

When constructing the model, the duration of the types of work performed at individual stages of service performed by the warehouse enterprise personnel when processing foreign trade cargo was taken into account. In addition, the model takes into account the probability of errors and delays in rendering warehouse services at each stage of the business entity's work, as well as the average delay time in the presence of errors. This can make it possible to determine the duration of additional employment of the enterprise personnel associated with the elimination of errors made in all types of work.

Applying the devised model in practice will allow owners of warehouse enterprises to organize and plan activities of the business entity when servicing customers. This will also make it possible to determine the duration of rendering warehouse services when performing foreign trade operations, taking into account the indicators of the efficiency of specialists.

At the same time, the probability of refusal to provide warehouse services to customers could decrease by 17% while the throughput capacity of the enterprise would increase by 22%.

Keywords: warehouse enterprise, simulation model, logistics chain, road transportation, personnel management.

References

1. Hosseini, M., Chalil Madathil, S., Khasawneh, M. T. (2025). Reinforcement learning-based simulation optimization for an integrated manufacturing-warehouse system: a two-stage approach. Expert Systems with Applications, 290, 128259. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128259
2. Anoop, K. P., Panicker, V. V., Das, A. S., Abhishek, T., Vadlamani, P. S., Akhil, U. S. (2020). Simulation modelling and analysis of warehouse operations in a food grain supply chain. International Journal of Logistics Systems and Management, 37 (4), 465. https://doi.org/10.1504/ijlsm.2020.111853
3. Erlangga, S. B., Yunita, A., Satriana, S. R. (2022). Development of Automatic Real Time Inventory Monitoring System using RFID Technology in Warehouse. JOIV : International Journal on Informatics Visualization, 6 (3), 636. https://doi.org/10.30630/joiv.6.3.1231
4. Kim, T. Y. (2020). Improving warehouse responsiveness by job priority management: A European distribution centre field study. Computers & Industrial Engineering, 139, 105564. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.011
5. Fedorko, G., Molnár, V., Mikušová, N. (2020). The Use of a Simulation Model for High-Runner Strategy Implementation in Ware-

house Logistics. Sustainability, 12 (23), 9818. https://doi.org/10.3390/su12239818
6. Zeng, Y., Li, W., Li, C. (2024). A dynamic simulation framework based on hybrid modeling paradigm for parallel scheduling systems in warehouses. Simulation Modelling Practice and Theory, 133, 102921. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.102921
7. Krynke, M. (2024). Virtual Simulation Modeling as a Key Element of Warehouse Location Optimization Strategy. Management Systems in Production Engineering, 32 (3), 339–344. https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0032
8. Dimitrov, R. (2024). Simulation Modelling of Multi-Agent Logistics Model in AnyLogistix Environment. Science, Engineering and Education, 9 (1), 75–82. https://doi.org/10.59957/see.v9.i1.2024.10
9. Agalianos, K., Ponis, S. T., Aretoulaki, E., Plakas, G., Efthymiou, O. (2020). Discrete Event Simulation and Digital Twins: Review and Challenges for Logistics. Procedia Manufacturing, 51, 1636–1641. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.228
10. Hosseini, M., Chalil Madathil, S., Khasawneh, M. T. (2025). Reinforcement learning-based simulation optimization for an integrated manufacturing-warehouse system: a two-stage approach. Expert Systems with Applications, 290, 128259. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128259
11. Erlangga, S. B., Yunita, A., Satriana, S. R. (2022). Development of Automatic Real Time Inventory Monitoring System using RFID Technology in Warehouse. JOIV: International Journal on Informatics Visualization, 6 (3), 636. https://doi.org/10.30630/joiv.6.3.1231
12. Lebid, I., Luzhanska, N., Lebid, I., Mazurenko, A., Roi, M., Medvediev, I. et al. (2023). Development of a simulation model of the activities of a transport and forwarding enterprise in the organization of international road cargo transportation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (3 (126)), 6–17. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291039
13. GPSS World Reference Manual (20021). Holly Springs NC, 305. Available at: https://athena.ecs.csus.edu/~mitchell/csc148/gpssW/Reference%20Manual/reference_manual.htm

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342416

ASSESSING THE EFFICIENCY OF CENTRALIZED USE OF TRAIN FORMATIONS WITHIN AN EXTENSIVE SUPPLY NETWORK FOR METALLURGICAL PRODUCTION (p. 46–55)

Oleksandr Zaruba
Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5129-9660

Andrii Okorokov
Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3111-5519

Roman Vernyhora
Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7618-4617

Oleh Prokopa
Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6721-4605

Yurii Khomenko
Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2386-0062

This study investigates a transportation-technological system that enables raw material supply by rail to meet the needs of a metallurgical enterprise. The task addressed is to assess the effectiveness of centralized use of train shipments in an extensive supply network for the needs of metallurgical production. The hypothesis of the study assumes that under conditions of centralized management of the rolling stock fleet of railroad transport within an extensive supply network, its number will be smaller than in the case of a non-centralized one. A mathematical and simulation model has been built in the AnyLogic University Researcher environment using agent and discrete-event approaches. The main criterion is the minimization of the average delivery time; additional criteria are the optimal use of the working fleet of railroad cars and train locomotives. Applying them in combination makes it possible to optimize the working fleet of railroad cars and locomotives, taking into account the extensiveness of the supply network and the conditions of centralized management.

It was experimentally established that with centralized fleet management, fluctuations and volumes of metallurgical raw material residues at the enterprise depend on the loading rate of railroad cars of the sending or group of railroad cars of the stepped routes. According to the calculated values of the determination coefficients, the approximation by the exponential function turned out to be denser. The variability of raw material residues decreases with a change in the technical loading rate of the train or railroad car batch. It was established that the difference between the standard deviation for the train loading rate of 4000 t ($\sigma(x) = 4524.7$ t) and the standard deviation of 2606.5 t ($\sigma(x) = 4524.7$ t) is 1918.2 t. This corresponds to 42% of the initial value of the indicator.

The proposed approach allows for a more accurate assessment of the need for a working fleet of railroad cars and locomotives, as well as improves the efficiency of transportation management.

Keywords: inventory logistics, inventory fluctuations, raw material supply, supply reliability, optimal work fleet, agent simulation.

References

1. Namazov, M., Matsiuk, V., Bulgakova, I., Nikolaienko, I., Vernyhora, R. (2023). Agent-based simulation model of multimodal iron ore concentrate transportation. Machinery & Energetics, 14 (1). https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.46
2. Hennequin, S., Yazdani, M. A., Roy, D. (2022). Echelon Base Stock Policy for Symbiotic and Reverse Logistic Flows. IFAC-PapersOnLine, 55 (10), 269–274. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.399
3. Ruiz Estrada, M. A., Koutronas, E. (2019). The multi-dimensional ports stock inventory and logistic control graphical modelling. Procedia Computer Science, 149, 80–85. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.110
4. Kholidasari, I., Ophiyandri, T. (2018). A Review of Human Judgment in Stock Control System for Disaster Logistics. Procedia Engineering, 212, 1319–1325. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.170
5. Salamian, F., Paksaz, A., Khalil Loo, B., Mousapour Mamoudan, M., Aghsami, M., Aghsami, A. (2024). Supply Chains Problem During Crises: A Data-Driven Approach. Modelling, 5 (4), 2001–2039. https://doi.org/10.3390/modelling5040104
6. Katsman, M. D., Myronenko, V. K., Matsiuk, V. I., Lapin, P. V. (2021). Approach to Determining the Parameters of Physical Security Units for a Critical Infrastructure Facility. Reliability: Theory & Applications, 16 (1 (61)), 71–80. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2021-161-71-80
7. Samsonkin, V., Goretskyi, O., Matsiuk, V., Myronenko, V., Boynik, A., Merkulov, V. (2019). Development of an approach for operative control over railway transport technological safety based on the identification of risks in the indicators of its operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (3 (102)), 6–14. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184162

8. Matsiuk, V., Ilchenko, N., Pryimuk, O., Kochubei, D., Prokhorchenko, A. (2022). Risk assessment of transport processes by agent-based simulation. 13TH International Scientific Conference On Aeronautics, Automotive And Railway Engineering And Technologies (BulTrans-2021), 2557, 080003. https://doi.org/10.1063/5.0105913
9. Chung, W., Talluri, S., Kovács, G. (2018). Investigating the effects of lead-time uncertainties and safety stocks on logistical performance in a border-crossing JIT supply chain. Computers & Industrial Engineering, 118, 440–450. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.018
36. Osman, H., Azab, A., Baki, F., Gadalla, M. (2025). Stock design in hybrid manufacturing using a constrained clustering approach. Manufacturing Letters, 44, 253–260. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.06.031
37. Maiyar, L. M., Thakkar, J. J. (2019). Modelling and analysis of intermodal food grain transportation under hub disruption towards sustainability. International Journal of Production Economics, 217, 281–297. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.021
38. Islam, Md. M., Lingkon, Md. L. R. (2025). Rolling planning-based closed-loop supply chain logistics model under an unstable demand scenario. Cleaner Waste Systems, 12, 100392. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100392
39. Wang, Y., Chen, Q., Dai, B., Wang, D. (2024). Guidance and review: Advancing mining technology for enhanced production and supply of strategic minerals in China. Green and Smart Mining Engineering, 1 (1), 2–11. https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.03.005
40. Turpak, S., Ostrohliad, O., Trushevsky, V., Padchenko, O. (2024). Analysis of the Efficiency of Metallurgical Raw Material Delivery in Universal and Specialized Wagons by Economic Criterion. Transport Means 2024. Proceedings of the 28th International Scientific Conference. https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.p405-410
41. Anufriyeva, T., Matsiuk, V., Shramenko, N., Ilchenko, N., Pryimuk, O., Lebid, V. (2023). Construction of a simulation model for the transportation of perishable goods along variable routes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (4 (122)), 42–51. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277948
42. Katsman, M. D., Matsiuk, V. I., Myronenko, V. K. (2023). Modeling the reliability of transport under extreme conditions of operation as a queuing system with priorities. Reliability: Theory & Applications, 18 (2 (73)), 167–179. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-273-167-179
43. Katsman, M. D., Matsiuk, V. I., Myronenko, V. K. (2023). Study of the functioning of a multicomponent and multi-phase queuing system on the example of a vehicle repair enterprise. Reliability: Theory & Applications, 18 (3 (74)), 751–767. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-374-751-767
44. Matsiuk, V. I., Myronenko, V. K., Katsman, M. D. (2021). Tekhnolohichna nadiinist zaliznychnykh transportnykh system. Kyiv: TPK "Orkhideia".
45. Zaruba, O., Okorokov, A., Vernyhora, R., Zhuravel, I., Barkalova, N. (2024). Substantiating the reliability conditions for the production process at metallurgical enterprises through the fault-tolerant functioning of the system "extraction of raw materials – technological railroad routes – metallurgical production". Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (3 (130)), 37–48. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310679
46. Matsiuk, V., Galan, O., Prokhorchenko, A., Tverdomed, V. (2021). An Agent-Based Simulation for Optimizing the Parameters of a Railway Transport System. ICTERI-2021. Kherson, 121–128. Available at: https://icteri.org/icteri-2021/proceedings/volume-1/20210121.pdf
47. Yaqot, M., Menezes, B. C. (2023). Integrating mineral mining and metallurgical supply chains: a qualogistics approach. Computer Aided Chemical Engineering, 1759–1764. https://doi.org/10.1016/b978-0-443-15274-0.50279-1
48. Matsiuk, V., Yanovska, V., Hurochkina, V., Ilchenko, N., Tvoronovych, V. (2024). Prediction of CO2 emissions during multimodal grain transportation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1415 (1), 012036. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012036
49. Wang, Y., Wu, Y., Hao, C., Hong, C. (2025). Research on the scheduling in sea-rail intermodal trains based on full-length and full-occupied strategy. Research in Transportation Business & Management, 59, 101301. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2025.101301
50. Barthelmes, L., Görgülü, M. E., Kübler, J., Löffler, A., Kagerbauer, M., Vortisch, P. (2025). Modeling framework for the agent-based simulation of rail-based urban parcel transport: An application of a two-stage transport chain selection model in the city of Karlsruhe, Germany. Research in Transportation Business & Management, 59, 101306. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2025.101306

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341559

DEVISING OF A METHOD FOR ANALYSING THE PROPAGATION SPEED OF CAR FLOWS IN A TRAIN FORMATION PLAN BASED ON SYNCHRONISATION THEORY IN COMPLEX NETWORKS (p. 56–67)

Andrii Kyman
Ukrainian State University
of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4000-3287

Andrii Prokhorchenko
Ukrainian State University
of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3123-5024

Artem Panchenko
V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5865-6158

Serhii Zolotarov
Ukrainian State University
of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5951-4589

Mykhailo Kravchenko
Kernel-Trade LLC, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7445-8952

Halyna Prokhorchenko
Ukrainian State University
of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1158-3953

Oleksandra Orda
Kharkiv National Automobile
and Highway University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7213-8469

This study investigates freight transportation process in the railroad network, which is formalized in the form of a train formation plan (TFP) as a complex dynamic system.

To assess the dynamic properties of a freight transportation model at the macro level of railroad system functioning, a method has been devised for analyzing the speed of transferring railroad car flows in the network. The proposed method reflects coordination dynamics not through the time of physical passage of trains in the network but through the ability of the system that organizes car flows into trains to quickly form a coherent state. The Kuramoto model was used to

determine the speed of coordination. That has made it possible to distinguish TFP networks.

The application of the devised method and the simulation made it possible to compare the structural and dynamic properties of existing transportation system over the period from 2013 to 2019. The limited ability of TFP networks to global phase integration has been proven. It has been established that the TFP network in 2019 demonstrated a loss of systemic coherence, which is typical of decentralized point-to-point transportation networks. That was confirmed by calculating $\lambda_2^{2013} \approx 19.913342$ and $\lambda_2^{2019} \approx 0.497646$, where the difference between spectral gaps reached two orders of magnitude, while the time to reach the maximum of the order parameter $r_{\max}$ in 2019 was 4.07 times greater at comparable values of the order and $K_C = 6$. This indicates the transformation of the operating model from a centralized hub-and-spoke in 2013 to a more decentralized point-to-point model in 2019.

A special feature of the results based on the study is that the proposed method makes it possible to improve the quality of macroanalysis of changes in the structural and dynamic efficiency of the TFP network.

The scope of results practical application is the railroad industry. Conditions for the practical implementation of the findings are the importance of taking into account the results when analyzing operating TFPs.

Keywords: Rail freight, railroad system, car flow, formation plan, hub-and-spoke, point-to-point, Kuramoto model.

References

1. Strong, J. S. (2024). Operating innovation in North American railroads: Activist investors and precision scheduling railroading. Case Studies on Transport Policy, 15, 101164. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2024.101164
2. Butko, T., Prokhorchenko, A., Golovko, T., Prokhorchenko, G. (2018). Development of the method for modeling the propagation of delays in noncyclic train scheduling on the railroads with mixed traffic. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (3 (91)), 30–39. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123141
3. Li, B., Jiang, S., Zhou, Y., Xuan, H. (2023). Optimization of train formation plan based on technical station under railcar demand fluctuation. Journal of Industrial and Production Engineering, 40 (6), 448–463. https://doi.org/10.1080/21681015.2023.2221699
4. Frisch, S., Hungerländer, P., Jellen, A., Lackenbucher, M., Primas, B., Steininger, S. (2022). Integrated freight car routing and train scheduling. Central European Journal of Operations Research, 31 (2), 417–443. https://doi.org/10.1007/s10100-022-00815-3
5. Butko, T., Prokhorov, V., Chekhunov, D. (2017). Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (3 (85)), 55–61. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93276
6. JSC "Ukrainian railways". Available at: https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation Last accessed: 12.08.2025
7. But'ko, T., Prokhorchenko, A. (2013). Investigation into Train Flow System on Ukraine's Railways with Methods of Complex Network Analysis. American Journal of Industrial Engineering, 1 (3), 41–45.
8. Zhang, X., Zhu, T. (2023). Emergence of synchronization in Kuramoto model with general digraph. Discrete and Continuous Dynamical Systems – B, 28 (3), 2335–2390. https://doi.org/10.3934/dcdsb.2022172
9. Daganzo, C. F., Geroliminis, N. (2008). An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. Transportation Research Part B: Methodological, 42 (9), 771–781. https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.06.008
10. Wang, Y., Yu, X., Guo, J., Papamichail, I., Papageorgiou, M., Zhang, L. et al. (2022). Macroscopic traffic flow modelling of large-scale freeway networks with field data verification: State-of-the-art review, benchmarking framework, and case studies using METANET. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 145, 103904. https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103904
11. de Jong, G., Vierth, I., Tavasszy, L., Ben-Akiva, M. (2012). Recent developments in national and international freight transport models within Europe. Transportation, 40 (2), 347–371. https://doi.org/10.1007/s11116-012-9422-9
12. Butko, T., Muzykin, M., Prokhorchenko, A., Nesterenko, H., Prokhorchenko, H. (2019). Determining the Rational Motion Intensity of Train Traffic Flows on the Railway Corridors with Account for Balance of Expenses on Traction Resources and Cargo Owners. Transport and Telecommunication Journal, 20 (3), 215–228. https://doi.org/10.2478/ttj-2019-0018
13. Szymula, C., Bešinović, N., Nachtigall, K. (2024). Quantifying periodic railway network capacity using petri nets and macroscopic fundamental diagram. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 158, 104436. https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104436
14. Khomenko, Y., Okorokov, A., Matsiuk, V., Zhuravel, I., Pavlenko, O. (2025). Revealing the causes of delays at transit points along an intermodal grain supply chain. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (3 (136)), 40–50. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.338166
15. Helbing, D. (2001). Traffic and related self-driven many-particle systems. Reviews of Modern Physics, 73 (4), 1067–1141. https://doi.org/10.1103/revmodphys.73.1067
16. Saw, V.-L., Chung, N. N., Quek, W. L., Pang, Y. E. I., Chew, L. Y. (2019). Bus bunching as a synchronisation phenomenon. Scientific Reports, 9 (1). https://doi.org/10.1038/s41598-019-43310-7
17. Kuramoto, Y.; Araki, H. (Ed.) (1975). Lecture Notes in Physics, International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics. Vol. 39. New York: Springer-Verlag, 420.
18. Rodriguez, M., Fathy, H. K. (2022). Distributed Kuramoto Self-Synchronization of Vehicle Speed Trajectories in Traffic Networks. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 23 (7), 6786–6796. https://doi.org/10.1109/tits.2021.3062178
19. Fretter, C., Krumov, L., Weihe, K., Müller-Hannemann, M., Hütt, M.-T. (2010). Phase synchronization in railway timetables. The European Physical Journal B, 77 (2), 281–289. https://doi.org/10.1140/epjb/e2010-00234-y
20. Yoon, S., Sorbaro Sindaci, M., Goltsev, A. V., Mendes, J. F. F. (2015). Critical behavior of the relaxation rate, the susceptibility, and a pair correlation function in the Kuramoto model on scale-free networks. Physical Review E, 91 (3). https://doi.org/10.1103/physreve.91.032814
21. Wang, Y., Doyle, F. J. (2013). Exponential Synchronization Rate of Kuramoto Oscillators in the Presence of a Pacemaker. IEEE Transactions on Automatic Control, 58 (4), 989–994. https://doi.org/10.1109/tac.2012.2215772
22. Wang, W., Du, W., Liu, K., Tong, L. (2022). The Evolution of China's Railway Network (CRN) 1999-2019: Urbanization Impact and Regional Connectivity. Urban Rail Transit, 8 (2), 134–145. https://doi.org/10.1007/s40864-022-00168-9
23. Peng, S., Lu, J., Jiang, B., Zhu, J. (2024). Synchronization of high-dimensional Kuramoto-oscillator networks with variable-gain impulsive coupling on the unit sphere. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 54, 101536. https://doi.org/10.1016/j.nahs.2024.101536
24. Lei, L., Han, W., Yang, J. (2021). Kuramoto model with correlation between coupling strength and natural frequency. Chaos, Solitons & Fractals, 144, 110734. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.110734

25. Böhle, T., Kuehn, C., Thalhammer, M. (2021). On the reliable and efficient numerical integration of the Kuramoto model and related dynamical systems on graphs. International Journal of Computer Mathematics, 99 (1), 31–57. https://doi.org/10.1080/00207160.2021.1952997
26. Gherardini, S., Gupta, S., Ruffo, S. (2018). Spontaneous synchronisation and nonequilibrium statistical mechanics of coupled phase oscillators. Contemporary Physics, 59 (3), 229–250. https://doi.org/10.1080/00107514.2018.1464100
27. McGraw, P. N., Menzinger, M. (2007). Analysis of nonlinear synchronization dynamics of oscillator networks by Laplacian spectral methods. Physical Review E, 75 (2). https://doi.org/10.1103/physreve.75.027104
28. O'Kelly, M. E., Park, Y. (2023). Contrasts in Sustainability between Hub-Based and Point-to-Point Airline Networks. Sustainability, 15 (20), 15111. https://doi.org/10.3390/su152015111
29. Sabhahit, N. G., Khurd, A. S., Jalan, S. (2024). Prolonged hysteresis in the Kuramoto model with inertia and higher-order interactions. Physical Review E, 109 (2). https://doi.org/10.1103/physreve.109.024212
30. Arenas, A., Díaz-Guilera, A., Kurths, J., Moreno, Y., Zhou, C. (2008). Synchronization in complex networks. Physics Reports, 469 (3), 93–153. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2008.09.002

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.340757

IMPROVING CONTROL OVER OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF SUBWAY ROLLING STOCK BY USING RETROSPECTIVE PASSENGER FLOW ESTIMATION (p. 68–74)

Ivan Siroklyn
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9978-8261

Serhii Zmii
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7974-5181

Vasyl Sotnyk
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8039-1392

Olena Shcheblykina
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8304-2921

This study investigates the process that forms operational loads on the electric rolling stock within a city's underground railroad system. The task addressed relates to the impossibility to directly measure passenger flows on separate sections of the network because most control systems only record passenger entry and exit events without tracking their full route. This creates analytical gaps and makes it impossible to accurately assess the actual load, which is critical for technical diagnostics as well as maintenance.

To solve this problem, a method for estimating passenger flows has been devised, based on stochastic modelling of passenger movement on an oriented graph of the transport network.

An approach to load estimation has been proposed, the distinctive feature of which is the rejection of determining a single most probable route for each passenger. Instead, the conditional "weight" of a passenger is probabilistically distributed among the set of all possible routes that could lead him/her from the potential entry station to the actual exit station within time constraints.

Method verification by simulation on a conditional network showed high accuracy of the results (the average relative error did not exceed 0.5%). The distribution of errors is symmetrical, close to normal, and concentrated around zero, which indicates the absence of systematic deviations. The accuracy is attributed to the fact that the probability distribution makes it possible to level out the uncertainty of the passenger's choice of a specific route and obtain an objective integrated assessment of the load at the level of individual routes.

The scope of practical application of the results includes technical monitoring systems for rolling stock, adaptive repair planning, optimization of timetables, as well as improvement of transport safety in the context of using anonymous means of payment for travel.

Keywords: route reconstruction, subway, adaptive repair planning, optimization of timetables.

References

1. Cats, O., Gkiotsalitis, K., Schöbel, A. (2025). 50 years of Operations Research in public transport. EURO Journal on Transportation and Logistics, 14, 100160. https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2025.100160
2. Hussain, E., Bhaskar, A., Chung, E. (2021). Transit OD matrix estimation using smartcard data: Recent developments and future research challenges. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 125, 103044. https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103044
3. Sari Aslam, N., Barros, J., Lin, H., Murcio, R., Bei, H. (2024). Alighting location estimation from public transit data: a case study of Shenzhen. Transportation Planning and Technology, 48 (5), 937–952. https://doi.org/10.1080/03081060.2024.2382247
4. Tiam-Lee, T. J., Henriques, R. (2022). Route choice estimation in rail transit systems using smart card data: handling vehicle schedule and walking time uncertainties. European Transport Research Review, 14 (1). https://doi.org/10.1186/s12544-022-00558-x
5. Mo, B., Ma, Z., Koutsopoulos, H., Zhao, J. (2023). Passenger Path Choice Estimation Using Smart Card Data: A Latent Class Approach with Panel Effects Across Days. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.03808
6. Nagy, R., Horvát, F., Fischer, S. (2024). Innovative Approaches in Railway Management: Leveraging Big Data and Artificial Intelligence for Predictive Maintenance of Track Geometry. Tehnički vjesnik – Technical Gazette, 31 (4), 1245–1259. https://doi.org/10.17559/tv-20240420001479
7. Ou, Y., Mihăiţă, A.-S., Ellison, A., Mao, T., Lee, S., Chen, F. (2025). Rail Digital Twin and Deep Learning for Passenger Flow Prediction Using Mobile Data. Electronics, 14 (12), 2359. https://doi.org/10.3390/electronics14122359
8. Su, G., Li, P., Lian, D., Mo, P. (2025). A coordinated passenger flow control model for urban rail transit considering willingness to board. Multimodal Transportation, 4 (3), 100225. https://doi.org/10.1016/j.multra.2025.100225
9. Liu, J., Huang, W., Zhang, N., Ma, Z., Qian, Z. (2024). A Data-Driven Multi-Modal Fusion Method for Path Choice Estimation in Urban Rail Systems. https://doi.org/10.2139/ssrn.4994725
10. Wen, D., Lv, H., Yu, H. (2025). Data-Driven Approach for Passenger Assignment in Urban Rail Transit Networks: Insights From Passenger Route Choices and Itinerary Choices. Journal of Advanced Transportation, 2025 (1). https://doi.org/10.1155/atr/6620828
11. Makridis, M. A., Kouvelas, A. (2023). An adaptive framework for real-time freeway traffic estimation in the presence of CAVs. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 149, 104066. https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104066
12. Bernal, E., Rey, Á. (2019). Study of the Structural and Robustness Characteristics of Madrid Metro Network. Sustainability, 11 (12), 3486. https://doi.org/10.3390/su11123486

13. Tian, X., Zheng, B., Wang, Y., Huang, H.-T., Hung, C.-C. (2021). TRIPDECODER: Study Travel Time Attributes and Route Preferences of Metro Systems from Smart Card Data. ACM/IMS Transactions on Data Science, 2 (3), 1–21. https://doi.org/10.1145/3430768

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.340200

RESILIENCE MODEL DEVELOPMENT FOR MULTI-DEPOT VEHICLE ROUTING PROBLEMS WITH PROBABILITY CONSTRAINTS UNDER DISTURBANCE CONDITIONS (p. 75–82)

Herman Mawengkang
Universitas Sumatera Utara, North Sumatera, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0403-9415

Intan Syahrini
Syiah Kuala University, Aceh, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9616-8689

Muhammad Romi Syahputra
Universitas Sumatera Utara, North Sumatera, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3557-0778

Sutarman
Universitas Sumatera Utara, North Sumatera, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3619-1303

The object of this study is the multi-depot vehicle routing problem (MDVRP), which seeks optimal vehicle routes from multiple depots to geographically dispersed customers. The study addresses the problem of low reliability in traditional deterministic MDVRP models that fail to perform effectively under uncertain and disruptive conditions such as traffic congestion, infrastructure failures, demand fluctuations, and natural disasters. To overcome this limitation, a resilience-based optimization model is proposed by formulating the MDVRP with probability constraints that capture the likelihood of disturbances affecting route feasibility. The model integrates stochastic components into the routing process to balance cost minimization with service reliability under uncertainty. Computational experiments on an agro-logistics case involving five depots and twenty customers demonstrated that the proposed model reduced expected transportation costs by 36.4% compared with the Genetic Algorithm approach (494 vs. 777) and maintained service continuity in 100% of feasible scenarios with a reliability threshold of $\alpha = 0.7$. Moreover, approximately 25–30% of potential routes were identified as infeasible under disturbance scenarios, validating the model's probabilistic filtering mechanism. These results confirm that incorporating chance constraints and a Tabu search heuristic enhances the adaptability and robustness of multi-depot routing systems. The developed model can be practically applied to large-scale logistics systems, humanitarian relief operations, and distribution networks operating in regions prone to demand volatility or infrastructure disruptions, providing decision-makers with a reliable tool for sustainable and resilient route planning.

Keywords: resilience, vehicle routing, chance constraints, stochastic programming, Tabu search, logistics.

References

1. Mardešić, N., Erdelić, T., Carić, T., Đurasević, M. (2023). Review of Stochastic Dynamic Vehicle Routing in the Evolving Urban Logistics Environment. Mathematics, 12 (1), 28. https://doi.org/10.3390/math12010028
2. Tien, N. H., Anh, D. B. H., Thuc, T. D. (2019). lGobal Supply Chain and Logistics Management. Dehli: Academic Publications.
3. Zhu, R., Zhou, X. (2019). Cool Chain Logistics Distribution Routing Optimization for Urban Fresh Agricultural Products Considering Rejection of Goods. Proceedings of The First International Symposium on Management and Social Sciences (ISMSS 2019). https://doi.org/10.2991/ismss-19.2019.18
4. Zhao, L., Yu, Q., Li, M., Wang, Y., Li, G., Sun, S. et al. (2022). A review of the innovative application of phase change materials to cold-chain logistics for agricultural product storage. Journal of Molecular Liquids, 365, 120088. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120088
5. Wang, D., Ip, W. H. (2009). Evaluation and Analysis of Logistic Network Resilience With Application to Aircraft Servicing. IEEE Systems Journal, 3 (2), 166–173. https://doi.org/10.1109/jsyst.2009.2017395
6. Lam, C. Y. (2016). Resilience of logistics network: analysis and design. 2016 World Congress on Industrial Control Systems Security (WCICSS), 1–5. https://doi.org/10.1109/wcicss.2016.7882936
7. Mittal, A., Krejci, C., Craven, T. (2018). Logistics Best Practices for Regional Food Systems: A Review. Sustainability, 10 (1), 168. https://doi.org/10.3390/su10010168
8. Keating, A. (2012). Food Security in Australia: The Logistics of Vulnerability. Food Security in Australia, 21–34. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4484-8_2
9. Toth, P., Vigo, D. (2002). 1. An Overview of Vehicle Routing Problems. The Vehicle Routing Problem, 1–26. https://doi.org/10.1137/1.9780898718515.ch1
10. Coelho, B., Andrade-Campos, A. (2014). Efficiency achievement in water supply systems – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30, 59–84. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.010
11. Jayarathna, N., Lanel, J., Juman, Z. A. M. S. (2020). Five years of multi-depot vehicle routing problems. Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics, 5 (2), 109–123. https://doi.org/10.14254/jsdtl.2020.5-2.10
12. Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., Medaglia, A. L. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. European Journal of Operational Research, 225 (1), 1–11. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.08.015
13. Zhou, Y., Wang, J., Yang, H. (2019). Resilience of Transportation Systems: Concepts and Comprehensive Review. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 20 (12), 4262–4276. https://doi.org/10.1109/tits.2018.2883766
14. Figueiredo, B., Lopes, R. B., Sousa, A. de. (2025). Location–Routing Problems with Sustainability and Resilience Concerns: A Systematic Review. Logistics, 9 (3), 81. https://doi.org/10.3390/logistics9030081
15. Vairo, T., Pettinato, M., Reverberi, A. P., Milazzo, M. F., Fabiano, B. (2023). An approach towards the implementation of a reliable resilience model based on machine learning. Process Safety and Environmental Protection, 172, 632–641. https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.02.058
16. Castro, M. P., Bodur, M., Shalaby, A. (2024). Incorporating Service Reliability in Multi-depot Vehicle Scheduling. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.00836
17. Rahimian, H., Mehrotra, S. (2022). Frameworks and Results in Distributionally Robust Optimization. Open Journal of Mathematical Optimization, 3, 1–85. https://doi.org/10.5802/ojmo.15
18. Gmira, M., Gendreau, M., Lodi, A., Potvin, J.-Y. (2021). Tabu search for the time-dependent vehicle routing problem with time windows on a road network. European Journal of Operational Research, 288 (1), 129–140. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.05.041
19. Dong, L., Wang, J., Hu, X. (2025). Optimization of Joint Distribution Routes for Automotive Parts Considering Multi-Manufacturer Collaboration. Sustainability, 17 (14), 6615. https://doi.org/10.3390/su17146615
20. Heakl, A., Shaaban, Y. S., Takac, M., Lahlou, S., Iklassov, Z. (2025). SVRPBench: A Realistic Benchmark for Stochastic Vehicle Routing Problem. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.21887

21. Rahmaniani, R., Ghaderi, A. (2015). An algorithm with different exploration mechanisms: Experimental results to capacitated facility location/network design problem. Expert Systems with Applications, 42 (7), 3790–3800. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.12.051
22. Zhang, Y., Qi, M., Lin, W.-H., Miao, L. (2015). A metaheuristic approach to the reliable location routing problem under disruptions. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 83, 90–110. https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.09.001

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341939

DEVISING A METHODOLOGICAL APPROACH TO PRIORITIZING ROAD SECTIONS FOR MAINTENANCE WORK (p. 83–95)

Anna Kharchenko
National Transport University, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8166-6389

Vitalii Tsybulskyi
National Transport University, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3150-3965

Natalia Sokolova
National Transport University, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0678-8882

Alona Shpyh
National Transport University, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6909-7088

Alexander Kanin
National Transport University, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6849-2505

Oleh Smirnov
Design Engineer
THINK PLUS INTERNATIONAL ENGINEERING AND CONSULTING COMPANY LLC, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3323-9011

Anatolii Smirnov
THINK PLUS INTERNATIONAL ENGINEERING AND CONSULTING COMPANY LLC, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8389-6812

This study examines the process that prioritizes road sections for performing operational maintenance work to ensure compliance with the predefined level of requirements.

The task addressed is to prioritize road sections in order to enable long-term network maintenance. This issue is due to objective circumstances related to the existing lack of long-term financing, poor filling of databases on the condition of roads, the need to take into account various criteria depending on the purposes of budget allocations. Unlike similar studies, in which the basis is a simple arrangement of objects by their priority, a methodological approach has been devised that is long-term-focused and includes further optimization of the road maintenance program.

Importantly, an analytical hierarchical process (AHP) method was integrated into the mathematical model whose solution has been implemented in authentic RoadRange program. In practice, it allows road organizations to determine an effective, economically justified long-term program for operational maintenance of roads under an automated mode without additional costs for expensive software.

The devised methodological approach to prioritizing sections of highways was tested using data from the Kyiv oblast (Ukraine). Based on the calculation results, 14 sections had been identified that were included in the potential long-term program and met relevant conditions and criteria. The effectiveness of program formation was proven by calculating the ratio of the consistency index to the repair index that equaled 0.002, which does not exceed the limit value of 0.10.

The prospect of this study is to test the devised methodological approach at other critical infrastructure facilities and adapt it accordingly.

Keywords: analytical hierarchy process, consistency index, prioritization of road sections, long-term program.

References

1. Bao, S., Han, K., Zhang, L., Luo, X., Chen, S. (2021). Pavement Maintenance Decision Making Based on Optimization Models. Applied Sciences, 11 (20), 9706. https://doi.org/10.3390/app11209706
2. Hasan, A. E., Jaber, F. K. (2024). Prioritizing Road Maintenance: A Framework integrating Fuzzy Best-Worst Method and VIKOR for Multi-Criteria Decision Making. Engineering, Technology & Applied Science Research, 14 (3), 13990–13997. https://doi.org/10.48084/etasr.7056
3. Barrette, P. D., Hori, Y., Kim, A. M. (2022). The Canadian winter road infrastructure in a warming climate: Toward resiliency assessment and resource prioritization. Sustainable and Resilient Infrastructure, 7 (6), 842–860. https://doi.org/10.1080/23789689.2022.2094124
4. Rambhia, M., Volk, R., Rismanchi, B., Winter, S., Schultmann, F. (2024). Prioritizing urban green spaces in resource constrained scenarios. Resources, Environment and Sustainability, 16, 100150. https://doi.org/10.1016/j.resenv.2024.100150
5. Rejani, V. U., Janani, L., Venkateswaralu, K., Sunitha, V., Mathew, S. (2022). Strategic Pavement Maintenance and Rehabilitation Analysis of Urban Road Network Using HDM-4. International Journal of Pavement Research and Technology, 16 (4), 927–942. https://doi.org/10.1007/s42947-022-00171-0
6. Huang, L.-L., Lin, J.-D., Huang, W.-H., Kuo, C.-H., Chiou, Y.-S., Huang, M.-Y. (2024). Developing Pavement Maintenance Strategies and Implementing Management Systems. Infrastructures, 9 (7), 101. https://doi.org/10.3390/infrastructures9070101
7. Mataei, B., Nejad, F. M., Zakeri, H. (2021). Pavement maintenance and rehabilitation optimization based on cloud decision tree. International Journal of Pavement Research and Technology, 14 (6), 740–750. https://doi.org/10.1007/s42947-020-0306-7
8. Chundi, V., Raju, S., Waim, A. R., Swain, S. S. (2021). Priority ranking of road pavements for maintenance using analytical hierarchy process and VIKOR method. Innovative Infrastructure Solutions, 7 (1). https://doi.org/10.1007/s41062-021-00633-7
9. Farhan, J., Fwa, T. F. (2009). Pavement Maintenance Prioritization Using Analytic Hierarchy Process. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2093 (1), 12–24. https://doi.org/10.3141/2093-02
10. Nautiyal, A., Sharma, S. (2021). Scientific approach using AHP to prioritize low volume rural roads for pavement maintenance. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 28 (2), 411–429. https://doi.org/10.1108/jqme-12-2019-0111
11. Kresnanto, N. C. (2022). Prioritizing District Road Maintenance Using AHP Method. Proceedings of the Second International Conference of Construction, Infrastructure, and Materials, 363–371. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7949-0_32
12. Fawzy, M. M., Elsharkawy, A. S., Hassan, A. A., Khalifa, Y. A. (2023). Prioritization of Egyptian Road Maintenance Using Analytic Hierarchy Process. International Journal of Pavement Research and Technology, 18 (2), 391–404. https://doi.org/10.1007/s42947-023-00351-6
13. Chaipetch, P. (2022). Analytical of multi-criteria approach for identifying the weight and factor of rural road maintenance

prioritization. International Journal of GEOMATE, 22 (91). https://doi.org/10.21660/2022.91.gxi334

14. Ahmed, S., Vedagiri, P., Krishna Rao, K. V. (2017). Prioritization of pavement maintenance sections using objective based Analytic Hierarchy Process. International Journal of Pavement Research and Technology, 10 (2), 158–170. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.01.001
15. Sayadinia, S., Beheshtinia, M. A. (2020). Proposing a new hybrid multi-criteria decision-making approach for road maintenance prioritization. International Journal of Quality & Reliability Management, 38 (8), 1661–1679. https://doi.org/10.1108/ijqrm-01-2020-0020
16. Bouraima, M. B., Qiu, Y., Kiprotich Kiptum, C., Maraka Ndiema, K. (2022). Evaluation of Factors Affecting Road Maintenance in Kenyan Counties Using the Ordinal Priority Approach. Journal of Computational and Cognitive Engineering, 2 (3), 260–265. https://doi.org/10.47852/bonviewjcce2202272
17. Ayalew, G. G., Meharie, M. G., Worku, B. (2022). A road maintenance management strategy evaluation and selection model by integrating Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods: The case of Ethiopian Roads Authority. Cogent Engineering, 9 (1). https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2146628
18. Ouma, Y. O., Opudo, J., Nyambenya, S. (2015). Comparison of Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS for Road Pavement Maintenance Prioritization: Methodological Exposition and Case Study. Advances in Civil Engineering, 2015, 1–17. https://doi.org/10.1155/2015/140189
19. Ayalew, G., Ayalew, G., Limenih, Z., Meharie, M. (2025). A Hybrid Approach Based on Factor Analysis and Fuzzy AHP Multi-criteria Decision-Making Model for Evaluating Pavement Maintenance Management Practices: The Case of Ethiopian Roads Authority. Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering, 10 (4), 131–152. https://doi.org/10.11648/j.jccee.20251004.11
20. Bodnar, L., Panibratets, L., Kanin, O., Stepanov, S. (2023). System of criteria for the importance of bridges with the possibility of adjusting their weight influences. Dorogi i Mosti, 2023 (27), 199–215. https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.199
21. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences, 1 (1), 83. https://doi.org/10.1504/ijssci.2008.017590
22. Kharchenko, A., Tsybulskyi, V., Chechuha, O., Zavorotnii, S., Shuliak, I. (2022). Building a model for managing the cost and duration of motor road projects. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (3 (117)), 13–22. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.256213

АНОТАЦІЇ

CONTROL PROCESSES

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.340603

РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ НА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ ВУЗЛИ СЕРВЕРНОГО КЛАСТЕРА НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ТА РІВНОВАГИ НЕША (с. 6–17)

Є. І. Нерознак, О. О. Троцько, В. В. Фесьоха, Д. Д. Балан, Р. О. Бєляков

Об'єктом дослідження є процес управління (балансування) навантаженням на обчислювальні вузли серверного кластера інформаційних систем. У дослідженні вирішується проблема щодо забезпечення оптимального (рівномірного) розподілу серверних ресурсів кластерної системи. Розроблено імітаційну модель процесу розподілу навантаження на обчислювальні вузли серверного кластера на основі удосконаленої моделі оптимального використання серверних ресурсів кластера на основі рівноваги Неша та удосконаленого методу адаптивного балансування навантаження в кластерних системах на основі рівноваги Неша. Імітаційна модель побудована на основі теорії нечіткої логіки для визначення доцільності декомпозиції завдань на підзавдання та теорії ігор, зокрема рівноваги Неша для визначення оптимального розподілу завдань/підзавдань по серверам кластерної системи для їх паралельної обробки. Розроблена модель дозволяє підвищити ефективність (рівномірність) розподілу серверних ресурсів в середньому на 13% у порівнянні із класичним методом управління навантаженням на основі рівноваги Неша, на 61% – із методом Round Robin та 63% – із методом Least Connection на протязі усього процесу функціонування кластеру. Це, у свою чергу, дозволяє більше ніж у 2 рази збільшити кількість оброблених завдань спричинених клієнтськими запитами у порівнянні із вищезазначеними методами балансування навантаження. Разом з тим, було проведено оцінку впливу процесу балансування навантаження на час обробки завдань/підзавдань серверами кластерної системи. За результатами імітаційного моделювання можна зробити висновок, що застосування розробленої моделі не перевищує загальний допустимий час обробки (не більше 315 мс) завдань/підзавдань спричинених клієнтськими запитами у порівнянні з існуючими методами балансування навантаження.

Ключові слова: імітаційна модель, серверний кластер, оптимізація, управління навантаженням, стійкість.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341940

ВПРОВАДЖЕННЯ ГІБРИДНОГО ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ CNN-LSTM ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДШКОДУВАННЯ ВИТРАТ В КОНТЕКСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРАТЕГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЛОУКОСТ-ПЕРЕВІЗНИКАМИ В АВІАКОМПАНІЇ PT LION MENTARI (с. 18–25)

Daniel D Rumani, Willy Arafah, Kusnadi

Об'єктом дослідження є модель прогнозування відшкодування витрат лоукост-авіакомпаній. Проблема полягає в складності фінансових та операційних моделей авіакомпанії, які охоплюють просторові та часові взаємодії, що ускладнює отримання точних та стабільних оцінок за допомогою однієї моделі прогнозування. Ця проблема безпосередньо впливає на здатність керівництва розробляти ефективні стратегії, включаючи встановлення тарифів, контроль вартості палива та планування маршрутів польотів. Для вирішення цієї проблеми в цьому дослідженні застосовується гібридний підхід глибокого навчання, CNN-LSTM. CNN використовується для вилучення просторових ознак з багатовимірних даних, тоді як LSTM фіксує довгострокові часові залежності за допомогою складного механізму оновлення пам'яті. Інтеграція цих двох моделей дозволяє обробляти більш насичену інформацію про моделі, ніж одна модель, що призводить до точніших прогнозів, які точно відповідають фактичним умовам. Інтерпретація дослідження показує, що гібридна модель здатна використовувати сильні сторони кожного компонента: CNN у вилученні локальних ознак та LSTM у розумінні часової динаміки. Це відображається в результатах прогнозування, які показують менше відхилення від фактичних даних порівняно з CNN або LSTM окремо. На основі результатів тестування даних про відшкодування витрат за 14 періодів, три моделі – CNN, LSTM та гібридна CNN-LSTM – продемонстрували високу та стабільну точність у відстеженні закономірності фактичного значення. З першого по четвертий період усі моделі дали результати, дуже близькі до фактичного значення, із середньою різницею менше 0,02. Наприклад, у четвертому періоді фактичне значення 0,88 було добре передбачено CNN (0,91), LSTM (0,886) та CNN-LSTM (0,876). Однак у шостий-дев'ятий періоди спостерігалося незначне зниження точності зі зменшенням фактичного значення, особливо у дев'ятому періоді, коли значення 0,74 було передбачено лише 0,731 CNN, 0,74 LSTM та 0,732 гібридною моделлю. Впровадження гібрида CNN-LSTM не тільки підвищує точність та надійність прогнозів окупності витрат, але й забезпечує стратегічну цінність для керівництва PT Lion Mentari Airlines, підтримуючи більш ефективне та оптимальне прийняття рішень для підвищення конкурентоспроможності лоукост-перевізника.

Ключові слова: гібрид, CNN-LSTM, прогнозування відновлення, лоукост-перевізник, глибоке навчання, оптимізація.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342159

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЛАНУВАННЯ ПОСАДОК КІЛЬКОХ ЛІТАКІВ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ З КВАНТОВИМ ВІДПАЛОМ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПРИ ОДНОКРАТНИХ ТА БАГАТОКРАТНИХ ЗАХОДАХ (с. 26–35)

Darmeli Nasution, Donni Nasution, Okvi Nugroho, Mahardika Abdi Prawira Tanjung

Об'єктом дослідження є планування посадки кількох літаків на одну та кілька злітно-посадкових смуг, що є вирішальним аспектом сучасних систем управління повітряним рухом. Основними проблемами, що вирішувались, були складність оптимізації планування через обмежену пропускну здатність злітно-посадкової смуги, необхідність підтримувати безпечну дистанцію між літаками та невизначеність очікуваного часу прибуття (ОЧП), на яку часто впливають зовнішні фактори, такі як погода та щільність повітряного руху. Щоб подолати ці проблеми, у цьому дослідженні пропонується гібридний підхід між методом градієнтного посилення довгострокової короткочасної пам'яті та методом квантового відпалу. Результати показують, що цей підхід здатний значно покращити продуктивність

системи планування з точністю 0,93, точністю 0,91, повнотою 0,90 та показником F1 0,91. Ці значення вищі, ніж у моделі без квантового відпалу, яка досягла лише точності 0,87, точності 0,85, повноти 0,83 та показника F1 0,84. Це покращення можна пояснити здатністю градієнтного підвищення довгої короткострокової пам'яті (ДКП) точніше прогнозувати відхилення ОЧП, а також ефективністю квантового відпалу в ефективному розв'язанні задачі квадратичної безобмеженої бінарної оптимізації. Унікальною особливістю цього дослідження є застосування гібридної моделі, яка поєднує можливості машинного навчання та квантових обчислень, досягаючи балансу між точністю прогнозування та ефективністю оптимізації. Ці результати дослідження можуть бути застосовані до систем планування повітряного руху в аеропортах з однією або кількома злітно-посадковими смугами. Їх впровадження має потенціал для підвищення операційної ефективності, зменшення затримок та підвищення безпеки польотів завдяки більш точному та адаптивному управлінню часом посадки.

Ключові слова: планування посадки літаків, ДКП-градієнт, квантовий відпал, машинне навчання, оптимізація, прогнозування ОЧП.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341456

РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РОБОТИ СКЛАДСЬКОГО ПІДПРИЄМСТВА ЯК ЛАНКИ ЛОГІСТИЧНОГО ЛАНЦЮГА (с. 36–45)

Є. М. Лебідь, Н. О. Лужанська, І. Г. Лебідь, О. О. Мазуренко, І. В. Михайленко, С. М. Шарай

Об'єктом дослідження є процес організації роботи складського підприємства при обслуговуванні замовників. Проблема, що вирішувалася, обумовлена потребою у розробці рекомендацій щодо планування штатної чисельності персоналу складського підприємства з урахуванням тривалості надання послуг замовникам.

Розроблено та реалізовано імітаційну модель роботи складського підприємства при обслуговуванні замовників в пакеті автоматизації імітаційного моделювання GPSS World. Модель передбачає визначення тривалості складського обслуговування та визначення необхідної кількості персоналу для забезпечення роботи суб'єкту господарювання за напрямками діяльності.

При розробці моделі враховано тривалість виконання видів робіт за окремими етапами обслуговування, які здійснюються персоналом складського підприємства при обробці зовнішньоторговельних вантажів. Окрім цього, в моделі враховано імовірність виникнення помилок та затримок при наданні складських послуг на кожному етапі роботи суб'єкта господарювання, а також середній час затримки при наявності помилок. Це дозволить визначити тривалість додаткової зайнятості персоналу підприємства, пов'язаної з усуненням допущених помилок за усіма видами робіт.

Застосування розробленої моделі на практиці дозволить власникам складських підприємств здійснювати організацію і планування діяльності суб'єкта господарювання при обслуговуванні замовників. Це також дасть можливість визначити тривалість надання складських послуг при виконанні зовнішньоторговельних операцій з урахуванням показників ефективності роботи фахівців.

При цьому імовірність відмови у наданні складських послуг замовникам зменшиться на 17%, а пропускна спроможність підприємства зросте на 22%.

Ключові слова: складське підприємство, імітаційна модель, логістичний ланцюг, автомобільні перевезення, кадрове забезпечення.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342416

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПОЇЗНИХ ФОРМУВАНЬ У РОЗГАЛУЖЕНІЙ МЕРЕЖІ ПОСТАЧАННЯ ДЛЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА (с. 46–55)

О. В. Заруба, А. М. Окороков, Р. В. Вернигора, О. І. Прокопа, Ю. Л. Хоменко

Об'єктом дослідження є транспортно-технологічна система постачання сировини залізничним транспортом для забезпечення потреб металургійного підприємства. Вирішувалась проблема оцінки ефективності централізованого використання поїзних відправлень у розгалуженій мережі постачання для потреб металургійного виробництва. Гіпотеза дослідження – за умов централізованого управління парком рухомого складу залізничного транспорту на розгалуженій мережі постачання, його кількість буде меншою, ніж при нецентралізованому. Розроблено математичну та імітаційну моделі в середовищі AnyLogic University Researcher із застосуванням агентного та дискретно-подієвого підходів. Головним критерієм є мінімізація середнього часу доставки, а додатковими критеріями – оптимальне використання робочого парку вагонів та поїзних локомотивів. Їх застосування у сукупності дозволяє оптимізувати робочий парк залізничних вагонів і локомотивів з урахуванням розгалуженості мережі постачання та умов централізованого управління.

Експериментально встановлено, що при централізованому управлінні парком, коливання і обсяги залишків металургійної сировини підприємства залежать від норми завантаження вагонів відправницького, чи групи вагонів ступінчастого маршрутів. Відповідно до розрахованих значень коефіцієнтів детермінації, щільнішою виявилася апроксимація експоненціальною функцією. Варіативність залишків сировини знижується зі зміною технічної норми завантаження складу поїзда або вагонної партії. Встановлено, що різниця між стандартним відхиленням для норми завантаження поїзда у 4000 т ($\sigma(x)$ = 4524,7 т) і стандартним відхиленням у 2606,5 т ($\sigma(x)$ = 4524,7 т) становить 1918,2 т. Це відповідає 42% від початкового значення показника.

Запропонований підхід дозволяє більш точно оцінити потребу в робочому парку вагонів та локомотивів, а також підвищити ефективність управління перевезеннями.

Ключові слова: логістика запасів, коливання запасів, постачання сировини, надійність постачання, оптимальний робочий парк, агентна симуляція.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341559

РОЗРОБКА МЕТОДУ АНАЛІЗУ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ВАГОНОПОТОКІВ У ПЛАНІ ФОРМУВАННЯ ПОЇЗДІВ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ В СКЛАДНИХ МЕРЕЖАХ (с. 56–67)

А. М. Киман, А. В. Прохорченко, А. С. Панченко, С. А. Золотарьов, М. А. Кравченко, Г. О. Прохорченко, О. О. Орда

Об'єктом дослідження є процес перевезень вантажів у залізничній мережі, що формалізований у вигляді плану формування поїздів (ПФП) як складної динамічної системи. Для оцінки динамічних властивостей моделі перевезень вантажів на макрорівні

функціонування залізничної системи розроблено метод аналізу швидкості передачі вагонопотоків в мережі. Запропонований метод відображає динаміку узгодження не через час фізичного проходження поїздів в мережі, а через здатність системи організації вагонопотоків в поїзди швидко формувати когерентний стан. Для визначення швидкості узгодження застосовано модель Курамото. Це дозволило розрізняти мережі ПФП.

Застосування розробленого методу та проведення моделювання дозволило порівняти структурно-динамічні властивості діючої системи перевезень в період між 2013–2019 рр. Доведена обмежена здатність мереж ПФП до глобальної фазової інтеграції. Встановлено, що мережа ПФП у 2019 році демонструє втрату системної узгодженості, що властиво децентралізованим мережам перевезень типу point-to-point. Це підтверджують розрахунки $\lambda_2^{2013} \approx 19{,}913342$ та $\lambda_2^{2019} \approx 0{,}497646$, де різниця між спектральними розривами сягає два порядки, а час досягнення максимуму параметру порядку $r_{\max}$ у 2019 році у 4,07 рази більший при порівнянних значеннях порядку та $K_C = 6$. Це свідчить про трансформацію операційної моделі від централізованої hub-and-spoke у 2013 році до більш децентралізованої point-to-point у 2019 році.

Особливість отриманих результатів в рамках дослідження полягає у тому, що запропонований метод дозволяє підвищити якість макроаналізу зміни структурно-динамічної ефективності мережі ПФП.

Сферою практичного застосування результатів є залізнична галузь. Умовами практичного застосування результатів дослідження є важливість врахування отриманих результатів при аналізі діючих ПФП.

Ключові слова: Rail freight, залізнична система, вагонопотік, план формування, hub-and-spoke, point-to-point, модель Курамото.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.340757

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНТРОЛЮ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ РЕТРОСПЕКТИВНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПАСАЖИРОПОТОКІВ (с. 68–74)

І. М. Сіроклин, С. О. Змій, В. О. Сотник, О. О. Щебликіна

Об'єктом дослідження є процес формування експлуатаційних навантажень на електрорухомий склад метрополітену. Вирішується проблема неможливості прямого вимірювання пасажиропотоків на окремих ділянках мережі через те, що більшість систем контролю фіксують лише події входу та виходу пасажирів, не відстежуючи повний маршрут. Це створює аналітичні прогалини та унеможливлює точну оцінку реального навантаження, що є критичним для технічної діагностики та планування обслуговування.

Для вирішення цієї проблеми розроблено метод оцінювання пасажиропотоків, що ґрунтується на стохастичному моделюванні переміщення пасажира на орієнтованому графі транспортної мережі.

Запропоновано метод оцінки навантаження, відмінною рисою якого є відмова від визначення єдиного найімовірнішого шляху для кожного пасажира Натомість, умовна «вага» пасажира ймовірнісно розподіляється між множиною всіх допустимих маршрутів, які могли привести його від потенційної станції входу до фактичної станції виходу в межах часових обмежень.

Апробація методу шляхом імітаційного моделювання на умовній мережі показала високу точність отриманих результатів (середня відносна похибка не перевищила 0.5%). Розподіл похибок є симетричним, близьким до нормального і зосередженим біля нуля, що свідчить про відсутність систематичних відхилень. Точність пояснюється тим, що ймовірнісний розподіл дозволяє нівелювати невизначеність вибору пасажиром конкретного шляху та отримати об'єктивну інтегровану оцінку навантаження на рівні окремих перегонів.

Сфера практичного використання результатів охоплює системи технічного моніторингу стану рухомого складу, адаптивне планування ремонтів, оптимізацію графіків руху та підвищення безпеки перевезень в умовах використання знеособлених засобів оплати проїзду.

Ключові слова: реконструкція маршрутів, метрополітен, адаптивне планування ремонтів, оптимізація графіків руху.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.340200

РОЗРОБКА МОДЕЛІ СТІЙКОСТІ ДЛЯ ЗАДАЧ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА КІЛЬКОХ СКЛАДАХ З ОБМЕЖЕННЯМИ ЙМОВІРНОСТІ В УМОВАХ ЗБУРЕНЬ (с. 75–82)

Herman Mawengkang, Intan Syahrini, Muhammad Romi Syahputra, Sutarman

Об'єктом цього дослідження є задача маршрутизації транспортних засобів на кількох складах (MDVRP), яка полягає в пошуку оптимальних маршрутів транспортних засобів від кількох складів до географічно розподілених клієнтів. Дослідження розглядає проблему низької надійності традиційних детермінованих моделей MDVRP, які не працюють ефективно в невизначених та деструктивних умовах, таких як затори на дорогах, збої інфраструктури, коливання попиту та стихійні лиха. Щоб подолати це обмеження, пропонується модель оптимізації на основі стійкості, яка формулює MDVRP з обмеженнями ймовірності, що враховують ймовірність порушень, що впливають на доцільність маршруту. Модель інтегрує стохастичні компоненти в процес маршрутизації, щоб збалансувати мінімізацію витрат з надійністю обслуговування в умовах невизначеності. Обчислювальні експерименти на агрологістичному випадку, що включає п'ять складів та двадцять клієнтів, показали, що запропонована модель знизила очікувані транспортні витрати на 36,4% порівняно з підходом генетичного алгоритму (494 проти 777) та підтримувала безперервність обслуговування у 100% можливих сценаріїв з порогом надійності $\alpha = 0{,}7$. Більше того, приблизно 25–30% потенційних маршрутів були визначені як нездійсненні за сценаріїв порушення, що підтверджує механізм ймовірнісної фільтрації моделі. Ці результати підтверджують, що включення обмежень випадковості та евристики забороненого пошуку підвищує адаптивність та стійкість систем маршрутизації з кількома складами. Розроблену модель можна практично застосувати до великомасштабних логістичних систем, операцій з надання гуманітарної допомоги та розподільчих мереж, що працюють у регіонах, схильних до волатильності попиту або збоїв в інфраструктурі, надаючи особам, що приймають рішення, надійний інструмент для сталого та стійкого планування маршрутів.

Ключові слова: стійкість, маршрутизація транспортних засобів, обмеження випадковості, стохастичне програмування, заборонений пошук, логістика.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341939

РОЗРОБКА МЕТОДИЧНОГО ПІДХОДУ ДО ПРІОРИТИЗАЦІЇ ДІЛЯНОК АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБІТ З ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО УТРИМАННЯ (с. 83–95)

А. М. Харченко, В. М. Цибульський, Н. М. Соколова, А. Ю. Шпиг, О. П. Канін, О. М. Смірнов, А. М. Смірнов

Об'єкт дослідження – процес пріоритизації ділянок автомобільних доріг з метою виконання робіт з експлуатаційного утримання для забезпечення дотримання заданого рівня вимог.

Досліджено проблему пріоритизації ділянок автомобільних доріг для цілей формування довгострокового утримання мережі. Ця проблема виникла через об'єктивні обставини, які пов'язані з наявним недоліком довгострокового фінансування, слабким наповненням баз даних про стан доріг, потребою врахування різноманітних критеріїв залежно від цілей бюджетних асигнувань. На відміну від аналогічних досліджень, де основою є просте упорядкування об'єктів за їх пріоритетом, розроблений методичний підхід орієнтований на довгостроковість та містить подальшу оптимізацію програми утримання доріг. При цьому в математичну модель інтегровано метод аналітичного ієрархічного процесу (AHP), розв'язання якої реалізовано в авторській програмі RoadRange. На практиці це дозволяє дорожнім організаціям визначати ефективну економічнообґрунтовану довгострокову програму експлуатаційного утримання доріг в автоматизованому режимі без додаткових витрат на дороговартісне програмне забезпечення.

Виконано апробацію розробленого методичного підходу до пріоритизації ділянок автомобільних доріг за даними Київської області (Україна). За результатами розрахунків було визначено 14 ділянок, які увійшли в потенційну довгострокову програму та задовільняли умовам і критеріям. Ефективність формування програми доведена за розрахунком показника співвідношення індексу погодженості з індексом ремонтування, який склав 0,002, що не перевищує граничне значення в 0,10.

Перспективою даного дослідження є виконання апробації розробленого методичного підходу на інших об'єктах критичної інфраструктури та його адаптація.

Ключові слова: аналітичний ієрархічний процес, індекс погодженості, пріоритизація ділянок доріг, довгострокова програма.