

## ABSTRACT AND REFERENCES

## CONTROL PROCESSES

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.343204

**CLEANING-IN-PLACE STATION DECOMPOSITION  
FOR OBJECT-ORIENTED CONTROL (p. 6–14)****Roman Mirkevych**

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-2796-9388>**Volodymyr Polupan**

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-8076-1369>**Oleksandr Pupena**

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9089-8325>**Oleh Klymenko**

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3525-7805>**Oleksii Mirkevych**

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-5215-6064>

This study considers a CIP station used for automated cleaning of process equipment in the food industry. The task addressed relates to the lack of a formalized methodology for decomposing a CIP station that would enable the construction of object-oriented control models in accordance with international standards.

The result of this study is the devised methodology for CIP station decomposition based on the principles of IEC 61512, which includes the identification of the levels of process cell, process units, equipment modules, as well as control modules. It has been shown that this approach allows for a structured representation of the equipment and its functions, enabling the integration of technological steps with the equipment of the CIP station.

The results are attributed to the fact that the CIP cleaning process has a hierarchical structure and procedural repeatability, which allows it to be formalized as a set of interrelated levels – from the process cell to individual equipment modules. This feature ensures consistency between the process logic and the physical structure of the equipment, which enhances the efficiency of control. A distinctive feature of the results is the combination of hardware hierarchy with information models, which differentiates the proposed solution from conventional descriptive approaches. This not only improves the flexibility and scalability of control systems but also creates conditions for building libraries of reusable software objects.

The results could be practically implemented at industrial enterprises in the food, pharmaceutical, and chemical industries where CIP stations are used. They could be integrated into current SCADA/PLC systems using AutomationML and OPC UA standards, ensuring compatibility with MES/ERP levels of control. This improves the efficiency of equipment operation while reducing the costs for designing and maintaining automation systems.

**Keywords:** CIP station, IEC 61512, object-oriented control, decomposition, process cell, process unit.

**References**

- Memisi, N., Moracanin, S. V., Milijasevic, M., Babic, J., Djukic, D. (2015). CIP Cleaning Processes in the Dairy Industry. *Procedia Food Science*, 5, 184–186. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2015.09.052>
- Jin, G., Jiang, Z., Sun, Y., Liu, Z., Liu, S., Wu, F. (2025). Intelligent clean-in-place (CIP) system in beverage (healthy water) cleaner production. *Food Control*, 168, 110877. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110877>
- Belei, O., Shtaiier, L., Stasiuk, R., Mirzoeva, A. (2023). Design of the human-machine interface for the cleaning-in-place system in the dairy industry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (2 (123)), 44–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282695>
- Obermeier, M., Braun, S., Vogel-Heuser, B. (2015). A Model-Driven Approach on Object-Oriented PLC Programming for Manufacturing Systems with Regard to Usability. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11 (3), 790–800. <https://doi.org/10.1109/tii.2014.2346133>
- Pupena, O., Elperin, I., Mirkevych, R. (2017). Modern standards of integrated management and ways of their implementation in Ukraine. *Scientific Works of NUFT*, 23 (1), 25–41. Available at: [https://elibrary.nuft.edu.ua/library/DocDescription?doc\\_id=355445](https://elibrary.nuft.edu.ua/library/DocDescription?doc_id=355445)
- Pupena, A., Elperin, I., Mirkevich, R., Klymenko, O. (2017). Computer integrated manufacturing: overview of modern standards. *Automation of Technological and Business Processes*, 8 (3), 63–74. <https://doi.org/10.15673/atbp.v8i3.571>
- Stenger, F., Schmalz, D., Bieringer, T., Brodhagen, A., Dreiser, C., Schweiger, A. (2016). Flexible Chemical Production by Modularization and Standardization: Status Quo and Future Trends. *Chemie Ingenieur Technik*, 88 (9), 1217–1217. <https://doi.org/10.1002/cite.201650240>
- Parant, A., Gellot, F., Zander, D., Carré-Ménétrier, V., Philippot, A. (2023). Model-based engineering for designing cyber-physical systems from product specifications. *Computers in Industry*, 145, 103808. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103808>
- Busboom, A. (2024). Automated generation of OPC UA information models – A review and outlook. *Journal of Industrial Information Integration*, 39, 100602. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100602>
- Henßen, R., Schleipen, M. (2014). Interoperability between OPC UA and AutomationML. *Procedia CIRP*, 25, 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.042>
- IEC 61512-1: BATCH Control Part 1: Models and Terminology (2013). International Electrotechnical Commission. Available at: <https://interoperable-europe.ec.europa.eu/collection/ict-standards-procurement/solution/iec-61512-11997-batch-control-part-1-models-and-terminology/distribution/iec-61512-11997-batch-control-part-1-models-and-terminology>
- Méndez, C. A., Cerdá, J., Grossmann, I. E., Harjunkski, I., Fahl, M. (2006). State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. *Computers & Chemical Engineering*, 30 (6-7), 913–946. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.02.008>
- Alvarado, J., Vegetti, M., Gonnet, S. (2025). Asset Administration Shell Submodel for Representing the Procedural Part of ISA-88 Recipes. *IEEE Latin America Transactions*, 23 (1), 36–42. <https://doi.org/10.1109/tla.2025.10810401>
- Garcia, A., Oregui, X., Arrieta, U., Valverde, I. (2022). Methodology and Tools to Integrate Industry 4.0 CPS into Process Design and Management: ISA-88 Use Case. *Information*, 13 (5), 226. <https://doi.org/10.3390/info13050226>
- Munoz, E., Capon-Garcia, E., Puigjaner, L. (2017). ANSI/ISA 88-95 Standards Based-Approach for Improved Integration of Recipes and Operational Tasks Supported by Knowledge Management. 27th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 2335–2340. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63965-3.50391-3>
- Unver, H. O. (2012). An ISA-95-based manufacturing intelligence system in support of lean initiatives. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65 (5-8), 853–866. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4223-z>
- De Minicis, M., Giordano, F., Poli, F., Schiraldi, M. M. (2014). Recipe Development Process Re-Design with ANSI/ISA-88 Batch Control Standard in the Pharmaceutical Industry. *International Journal of Engineering Business Management*, 6. <https://doi.org/10.5772/59025>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.343635

**OPTIMIZED ADAPTIVE MACHINE LEARNING FOR DYNAMIC DATA STREAMS (p. 15–25)****Aivar Sakhipov**

Astana IT University, Astana, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-4199>**Aruzhan Mektepbayeva**

Astana IT University, Astana, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0690-8431>**Amangul Talgat**K. Kulazhanov Kazakh University  
of Technology and Business, Astana, Republic of KazakhstanORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5800-9134>**Maxot Rakhmetov**Kh. Dosmukhamedov Atyrau University,  
Atyrau, Republic of KazakhstanORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9745-6925>**Ainagul Adiyeva**Kh. Dosmukhamedov Atyrau University,  
Atyrau, Republic of KazakhstanORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5962-4561>**Altynbek Seitenov**

Astana IT University, Astana, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-4363>**Nurzhan Ualiyev**I. Zhansugurov Zhetysay University,  
Taldy-Kurgan, Republic of KazakhstanORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8854-3525>**Shynar Yelezhanova**Kh. Dosmukhamedov Atyrau University,  
Atyrau, Republic of KazakhstanORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9815-9594>

The object of the study is the adaptive machine learning systems that are able to process large amounts of rapidly changing streaming data in real time. The problem of maintaining prediction accuracy and computational efficiency in the presence of concept drift is treated. Concept drift refers to the overweighting of static models when stationary models are tried, and the nature of the underlying distributions changes. The adaptive architecture includes revision divergence-oriented concept drift detection, incremental model updating via hyper-dimensional statistical clustering of segments. Results from experiments using simulated and real-world datasets demonstrate that the adaptive architecture maintains predictive accuracy above 0.83 across abrupt, gradual, recurrent, and continuous drift scenarios. Compared with non-adaptive models, adaptation latency is reduced by approximately 2.6×, while unnecessary retraining operations are decreased by up to 40%. These results are possible due to the fact that proposed framework is able to retrain solutions if, and only if, distributional changes are determined to be statistically significant and meaningful to the model. This leads to the avoidance of processors being given redundant computations and providing a steady-state model during non-drift conditions. A principal contribution is that feature engineering is accomplished in a drift-aware manner, thresholding is made adaptive to the distributions indicated, and update mechanisms are employed which efficiently utilize resources in a unified high-performance streaming pipeline. The architecture performs well under abrupt, gradual, recurrent, and continuous drift and effective for real-time applications which include smart-city analytics, cyber security monitoring, roadways system works, and IoT for industrial systems.

**Keywords:** adaptation model, computing performance, drift detection, streaming processing, rapid updating.

**References**

- Wang, J., Lu, T., Li, L., Huang, D. (2024). Enhancing Personalized Search with AI: A Hybrid Approach Integrating Deep Learning and Cloud Computing. *Journal of Advanced Computing Systems*, 4 (10), 1–13. <https://doi.org/10.69987/jacs.2024.41001>
- Navaux, P. O. A., Lorenzon, A. F., Serpa, M. da S. (2023). Challenges in High-Performance Computing. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 29 (1), 51–62. <https://doi.org/10.5753/jbcs.2023.2219>
- Mektepbayeva, A., Medarov, A., Kulmuratova, A. (2024). Analysis of Penetration Testing Methods for Specific IoT Device: IP Camera. 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), 76–82. <https://doi.org/10.1109/sist61555.2024.10629431>
- Jones, R., Davies, H. (2024). High-Performance Digital Forensic Framework for Anomalous Ransomware Detection in File System Log Data. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.172599923.38750111/v1>
- Xing, S., Wang, Y. (2025). Proactive Data Placement in Heterogeneous Storage Systems via Predictive Multi-Objective Reinforcement Learning. *IEEE Access*, 13, 117986–117998. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3586378>
- Wilson, A., Anwar, M. R. (2024). The Future of Adaptive Machine Learning Algorithms in High-Dimensional Data Processing. *International Transactions on Artificial Intelligence (ITALIC)*, 3 (1), 97–107. <https://doi.org/10.33050/italic.v3i1.656>
- Rane, N., Paramesha, M., Choudhary, S., Rane, J. (2024). Machine Learning and Deep Learning for Big Data Analytics: a Review of Methods and Applications. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4835655>
- Kamila, N. K., Frnda, J., Pani, S. K., Das, R., Islam, S. M. N., Bharti, P. K., Muduli, K. (2022). Machine learning model design for high performance cloud computing & load balancing resiliency: An innovative approach. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 34 (10), 9991–10009. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.10.001>
- Ahmadi, S. (2023). Optimizing Data Warehousing Performance through Machine Learning Algorithms in the Cloud. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 12 (12), 1859–1867. <https://doi.org/10.21275/sr231224074241>
- Ji, E., Wang, Y., Xing, S., Jin, J. (2025). Hierarchical Reinforcement Learning for Energy-Efficient API Traffic Optimization in Large-Scale Advertising Systems. *IEEE Access*, 13, 142493–142516. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3598712>
- Wang, S., Zheng, H., Wen, X., Fu, S. (2024). Distributed high-performance computing methods for accelerating deep learning training. *Journal of Knowledge Learning and Science Technology ISSN: 2959-6386 (Online)*, 3 (3), 108–126. <https://doi.org/10.60087/jklt.v3.n4.p22>
- Cravero, A., Sepúlveda, S. (2021). Use and Adaptations of Machine Learning in Big Data – Applications in Real Cases in Agriculture. *Electronics*, 10 (5), 552. <https://doi.org/10.3390/electronics10050552>
- Naayini, P., Kamatala, S. (2023). High-Performance Data Computing: Parallel Frameworks, Execution Strategies, and Real-World Deployments. *International Journal Of Scientific Advances*, 4 (6). <https://doi.org/10.51542/ijscia.v4i6.33>
- Usman, S., Mehmood, R., Katib, I., Albeshri, A. (2022). Data Locality in High Performance Computing, Big Data, and Converged Systems: An Analysis of the Cutting Edge and a Future System Architecture. *Electronics*, 12 (1), 53. <https://doi.org/10.3390/electronics12010053>
- Gadde, H. (2023). Leveraging AI for Scalable Query Processing in Big Data Environments. *International Journal of Advanced Engineering Technologies and Innovations*, 1 (02), 435–465. Available at: [https://www.academia.edu/124871455/Leveraging\\_AI\\_for\\_Scalable\\_Query\\_Processing\\_in\\_Big\\_Data\\_Environments](https://www.academia.edu/124871455/Leveraging_AI_for_Scalable_Query_Processing_in_Big_Data_Environments)
- Sakhipov, A., Omirzak, I., Fedenko, A. (2025). Beyond Face Recognition: A Multi-Layered Approach to Academic Integrity in Online Exams. *Electronic Journal of E-Learning*, 23 (1), 81–95. <https://doi.org/10.34190/ejel.23.1.3896>

17. Kaveh, M., Mesgari, M. S. (2022). Application of Meta-Heuristic Algorithms for Training Neural Networks and Deep Learning Architectures: A Comprehensive Review. *Neural Processing Letters*, 55 (4), 4519–4622. <https://doi.org/10.1007/s11063-022-11055-6>
18. Mektepbayeva, A., Begisbayev, D., Seitbek, R., Khaimuldin, N., Sakhipov, A., Rakhimzhanov, D. (2025). Adaptive Machine Learning Algorithms for Data Processing in Transportation Systems. 2025 IEEE 5th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), 1–8. <https://doi.org/10.1109/sist61657.2025.11139286>
19. Jumagaliyeva, A., Abdykerimova, E., Turkmenbayev, A., Serimbetov, B., Muratova, G., Yersultanova, Z., Zhiyembayev, Z. (2024). Identifying patterns and mechanisms of AI integration in blockchain for e-voting network security. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (2 (130)), 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305696>
20. Chinchani, S., Shaikh, A. A. (2022). A Review on Machine Learning, Big Data Analytics, and Design for Additive Manufacturing for Aerospace Applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31 (8), 6112–6130. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07125-4>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.347656

# **BUILDING A MODEL OF ARTILLERY FIRING EFFICIENCY UNDER CONDITIONS OF LIMITED AMMUNITION RESOURCES AND BARREL WEAR (p. 26–34)**

**Maksym Maksymov**

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7536-2570>

**Viktor Boltenkov**

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3366-974X>

**Yevhenii Dobrynin**

Naval Institute of the National University  
"Odesa Maritime Academy", Odesa, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2777-3137>

**Oleksandr Sidelnykov**

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0657-0215>

This study examines the process of destroying individual and group targets by an artillery battery under conditions of limited ammunition of a given quality and varying degrees of barrel bore wear.

The task addressed relates to the revealed lack of a quantitative model that would make it possible to assess the effectiveness of aimed or planar fire in the presence of resource limitations on shots and barrel bore wear, which could facilitate determining the threshold conditions for the feasibility of continuing fire.

A discrete stochastic model of the effectiveness of firing an artillery unit has been proposed. The model is designed to assess the effectiveness of aimed fire under conditions of limited resource of high-quality ammunition. The model also takes into account the presence of guns in the unit, the barrels of which have different levels of wear. It is proposed to divide shots from each gun in the artillery unit into four different classes, which takes into account the quality of the shot elements: the projectile and the propellant charge, as well as the condition of the barrel.

It is proposed to consider the successive states of the artillery unit's guns as elements of the Markov chain. It was established that it is possible to achieve a firing efficiency coefficient that lies within the range of 0.63–0.83. The limiting estimate of the firing efficiency coefficient of the artillery unit on a separate target was obtained, which is equal to 0.5.

The results showed that when the limiting value of the firing efficiency coefficient is obtained, aimed fire degenerates into planar target

destruction with enlarged scattering ellipses. This state leads to an almost twofold increase in the cost of shots and the time of firing, which sharply increases the risk of counter-battery damage to the battery.

Such results are attributed to the combination of the accepted classification of shots by quality, taking into account the increased wear of the barrel bores due to a decrease in the probability of hitting, and the analysis of a set of realistic gun firing strategies.

The model could be offered for performing tactical calculations when choosing a fire mode, the structure of using available ammunition, and assessing the feasibility of switching from aimed to plane fire.

**Keywords:** artillery battery, limited resources, barrel bore wear, firing efficiency coefficient, firing threshold conditions, counter-battery damage.

## **References**

1. Markov, D. (2025). A change in the way artillery is used, based on the Russia-Ukraine conflict. *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 5, 179–183. <https://doi.org/10.17770/etr2025vol5.8464>
2. Świętochowski, N. (2024). Field Artillery in the defensive war of Ukraine 2022–2023. Part II. Methods of task implementation. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*, 211 (1), 57–76. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4136>
3. Taranets, S., Fylypenko, A. (2025). The artillery application by the defense forces of Ukraine during the Russian-Ukrainian war. *Military Strategy and Technology*, 1 (1), 99–110. <https://doi.org/10.63978/3083-6476.2025.1.1.11>
4. Sampir, O., Vozniak, R., Horbachova, Y., Novikova, I. (2024). Analysis of the combat experience of the artillery weapon systems operation during the Russian-Ukrainian war. *Social Development and Security*, 14 (1), 113–126. <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.1.10>
5. Calcagno, E., Marrone, A. (2024). Artillery in Present and Future High-Intensity Operations. *Istituto Affari Internazionali (IAI)*. Available at: <http://www.jstor.org/stable/resrep63163>
6. Naumenko, I., Kuznetsov, V. (2023). Kontrbatarna borotba za dosvidom rosiisko-ukrainskoi viyny. *Scientific Collection "InterConf"*, 181, 456–459. Available at: <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/4931>
7. Kryvosheiev, A. M. (2009). Napriamky vykorystannia balistychnoi informatsiyi providnymy vyrobnykamy artyleriyskykh system. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 1, 49–63. Available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt\\_2009\\_1\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2009_1_13)
8. Gouveia, H., Freitas, R. (2024). Innovations and trends in field artillery weapon systems. *Cogent Social Sciences*, 10 (1). <https://doi.org/10.1080/23311886.2024.2411867>
9. Markov, D. (2024). Use of artillery fire support assets in the attrition approach in the Russia-Ukraine conflict. *Environment. Technologies. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 4, 178–182. <https://doi.org/10.17770/etr2024vol4.8208>
10. Jehličková, E., Konečný, P., Schmidt, M. (2025). Artillery Modular Charges Review. 2025 International Conference on Military Technologies (ICMT), 1–6. <https://doi.org/10.1109/icmt65201.2025.11061321>
11. Ma, J. (2018). The law of barrel wear and its application. *Defence Technology*, 14 (6), 674–676. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.06.012>
12. Banerjee, A., Nayak, N., Giri, D., Bandha, K. (2019). Effect of Gun Barrel Wear on Muzzle Velocity of a typical Artillery Shell. 2019 International Conference on Range Technology (ICORT), 1–3. <https://doi.org/10.1109/icort46471.2019.9069641>
13. Tsybuliak, B. Z. (2016). Parameters degradation barrel artillery equipment during exploitation. *Military Technical Collection*, 14, 121–126. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.14.2016.121-126>
14. Anipko, O., Baulin, D., Horielyshev, S., Boikov, I., Medvid, M., Babkov, Y. et al. (2024). Development of a method for predicting barrel wear resistance when using ammunition with a long storage life. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2, 119–130. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003298>



15. Shabatura, Y., Popovchenko, O. (2023). Modern methods and means of technical diagnostics of artillery weapons and prospects for their development. *Military Technical Collection*, 29, 90–101. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.29.2023.90-101>
16. Qi, W., Liu, J., Gou, Y., Han, Z., Li, B., Wang, K. (2024). Enhancing Artillery Barrel Wear Detection via CRNN-Based Acoustic Analysis and Domain Adaptation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2891 (11), 112018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2891/11/112018>
17. Świętochowski, N. (2023). Field Artillery in the defensive war of Ukraine 2022-2023 Part I. Combat potential, tasks and tactics. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*, 210 (4), 341–358. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.1631>
18. Sampir, O., Dachkovskiy, V. (2023). Analysis of the 155 mm howitzer M777 operation during its combat use by units of the Armed Force of Ukraine in the Russian-Ukraine war in 2022. *Social Development and Security*, 13 (2), 31–40. <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.2.4>
19. Nugroho, A., Ruyat, Y., Marsono, M. (2024). Comparison of Ballistic Performance Between Conventional and Modern Artillery Weapons: A Review on the M777 Howitzer Cannon. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 45 (2), 357–365.
20. Aries, H., Giegerich, B., Lawrenson, T. (2023). The Guns of Europe: Defence-industrial Challenges in a Time of War. *Survival*, 65 (3), 7–24. <https://doi.org/10.1080/00396338.2023.2218716>
21. Toshev, O., Kirkopulo, K., Klymchuk, O., Maksymov, M. (2025). Optimization of ammunition preparation strategies for modern artillery operations in computer simulation. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (2 (82)), 50–57. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.326225>
22. Guzik, D. M. (1988). A Markov model for measuring artillery fire support effectiveness. California: Postgraduate School.
23. Finlon, M. A. (1991). Analysis of the field artillery battalion organization using a Markov chain. Calhoun: The NPS Institutional Archive. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/36720787.pdf>
24. Boltenkov, V., Brunetkin, O., Dobrynin, Y., Maksymova, O., Kuzmenko, V., Gultsov, P. et al. (2021). Devising a method for improving the efficiency of artillery shooting based on the Markov model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (3 (114)), 6–17. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245854>
25. Shim, Y., Atkinson, M. P. (2018). Analysis of artillery shoot-and-scoot tactics. *Naval Research Logistics (NRL)*, 65 (3), 242–274. <https://doi.org/10.1002/nav.21803>
26. Maksymova, O., Boltynkov, V., Gultsov, P., Maksymov, O. (2023). Improvement of the model and method of artillery installation target damage control with minimal combat capability loss. *Odes'kyi Politechnichniy Universytet Pratsi*, 2 (68), 98–115. <https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.11>
27. Aldoege, M. (2019). Comparison between trajectory models for firing table application. North-West University, 94. Available at: <https://5dok.net/document/7q08x49y-comparison-between-trajectory-models-for-firing-table-application.html>
28. arma3. Available at: <https://arma3.com/>
29. Maksymova, O. B., Boltenkov, V. O., Maksymov, M. V., Gultsov, P. S., Maksymov, O. M. (2023). Development and optimization of simulation models and methods for controlling virtual artillery units in game scenarios. *Herald of Advanced Information Technology*, 6 (4), 320–337. <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.21>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.344643

# CONSTRUCTION OF A SIMULATION MODEL FOR MONITORING AND MANAGING ENVIRONMENTAL RISKS IN RAILROAD TRANSPORTATION ACCIDENTS INVOLVING HAZARDOUS GOODS (p. 35–47)

**Olena Kryvoruchko**

National University of Life and  
Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7661-9227>

**Maira Shalabayeva**

Kazakh University Ways of Communications,  
Almaty, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0420-6415>

**Svitlana Tsiutsiura**

State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4270-7405>

**Mykola Tsiutsiura**

State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4713-7568>

**Valentyna Makoiedova**

State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7518-894X>

**Valerii Lakhno**

National University of Life and  
Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9695-4543>

**Oleksandr Aliksieienko**

National Transport University, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3796-9929>

**Yaroslav Shestak**

State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5102-9642>

**Alina Korchevska**

National Transport University, Kyiv, Ukraine  
State Enterprise "National Institute  
for Development Infrastructure", Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8245-9891>

This study's object is the process of monitoring and managing environmental risks in railroad accidents involving transportation of hazardous goods.

A problem has been identified, related to the absence of a single, holistic approach to risk management during transportation, which would integrate methods of spatial-temporal forecasting with a formal assessment of uncertainty. A mathematical model has been suggested that makes it possible to process and analyze data acquired from a mobile automated air quality monitoring system (MAAQMS). The established dependences laid the foundation for the machine learning and statistical analysis model used in the operation of a simulation model (SM) of monitoring and managing environmental risks.

The simulation model, unlike similar ones, has been developed in the following directions:

- 1) representation of data and processing of omissions;
- 2) construction of probabilistic risk maps taking into account uncertainty and calibration of forecasts of the state of environmental pollution at the accident site;
- 3) adaptation of the model in case of data variability at the accident site;
- 4) multi-criteria optimization of management decisions.

In summary, the simulation model reported in this study provides decision-makers with the prospect of not only predicting the probability of exceeding the maximum permissible concentrations (MPC) of pollutants on the railroad infrastructure but also forming confidence risk maps.

Unlike similar solutions, the constructed model is ML-oriented. In other words, the prediction of risk level is built in a spatial-temporal statement on a railroad network graph taking into account data received from MAAQMS. The adequacy of the model was confirmed by achieving the area under the ROC curve ( $AUC = 0.990$ ) and the PR analysis indicator ( $AP = 0.940$ ).

**Keywords:** simulation model, environmental risk management, uncertainty, hazardous goods, rail transport.

## References

- Jalolova, M., Amirov, L., Askarova, M., Zakhidov, G. (2022). Territorial features of railway transport control mechanisms. *Transportation Research Procedia*, 63, 2645–2652. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.305>
- Yurchenko, O., Strelko, O., Rudiuk, M., Horban, A., Bernatskyi, A. (2023). Forecasting and Modeling of the Consequences of Transport Events During the Transportation of Dangerous Goods by Rail Transport. *Smart Technologies in Urban Engineering*, 378–389. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_33)
- Zaporozhets, O., Katsman, M., Matsiuk, V., Myronenko, V. (2024). Study of the functioning of a multi-component and multi-phase queuing system under the conditions of the implementation of disruptive technologies in air transportation. *Reliability: Theory Applications*, 19 (2 (78)), 576–593. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2024-278-576-593>
- Zelenko, Y., Dzhus, O., Dzhus, V., Yanchenko, D. (2019). Methodology of risk assessment and forms of environmental safety management for the transport of dangerous goods by railway transport. *MATEC Web of Conferences*, 294, 03011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929403011>
- Akhmetov, B., Lakhno, V., Blozva, A., Shalabayeva, M., Abuova, A., Skladannyi, P., Sagyndykova, Sh. (2022). Development of a mobile automated air quality monitoring system for use in places of technogenic accidents on railway transport. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 100 (5), 1287–1300. Available at: <https://www.jatit.org/volumes/Vol100No5/8Vol100No5.pdf>
- Lakhno, V., Shalabayeva, M., Kryvoruchko, O., Desiatko, A., Chubaievskiy, V., Alibiyeva, Z. (2023). Hardware-Software Complex for Predicting the Development of an Ecologically Hazardous Emergency Situation on the Railway. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 707–712. <https://doi.org/10.24425/ijet.2023.147691>
- Ditta, A., Figueroa, O., Galindo, G., Yie-Pinedo, R. (2019). A review on research in transportation of hazardous materials. *Socio-Economic Planning Sciences*, 68, 100665. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.11.002>
- Shen, X., Wei, S. (2021). Severity analysis of road transport accidents of hazardous materials with machine learning. *Traffic Injury Prevention*, 22 (4), 324–329. <https://doi.org/10.1080/15389588.2021.1900569>
- Vahabzadeh, S., Haghsheenas, S. S., Ghouschi, S. J., Guido, G., Simic, V., Marinkovic, D. (2025). A New Framework For Risk Assessment Of Road Transportation Of Hazardous Substances. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.22190/fume240801007v>
- Yu, S., Li, Y., Xuan, Z., Li, Y., Li, G. (2022). Real-Time Risk Assessment for Road Transportation of Hazardous Materials Based on GRU-DNN with Multimodal Feature Embedding. *Applied Sciences*, 12 (21), 11130. <https://doi.org/10.3390/app122111130>
- Liu, L., Wu, Q., Li, S., Li, Y., Fan, T. (2021). Risk Assessment of Hazmat Road Transportation Considering Environmental Risk under Time-Varying Conditions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (18), 9780. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189780>
- Li, Y., Xu, D., Shuai, J. (2020). Real-time risk analysis of road tanker containing flammable liquid based on fuzzy Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*, 134, 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.033>
- Dong, S., Zhou, J., Ma, C. (2020). Design of a Network Optimization Platform for the Multivehicle Transportation of Hazardous Materials. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (3), 1104. <https://doi.org/10.3390/ijerph17031104>
- Ebrahimi, H. (2023). Analyzing the risks associated with railway transportation of hazardous materials and developing process models for railway incidents with high potential for release using machine learning and data analytics. Hadiseh Ebrahimi. <https://doi.org/10.7939/r3-d5hg-3937>
- Jin, G., Liang, Y., Fang, Y., Shao, Z., Huang, J., Zhang, J., Zheng, Y. (2024). Spatio-Temporal Graph Neural Networks for Predictive Learning in Urban Computing: A Survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 36 (10), 5388–5408. <https://doi.org/10.1109/tkde.2023.3333824>
- Sahili, Z. A., Awad, M. (2023). Spatio-temporal graph neural networks: A survey. *Computer Science: arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.10569>
- Jin, X.-B., Wang, Z.-Y., Kong, J.-L., Bai, Y.-T., Su, T.-L., Ma, H.-J., Chakrabarti, P. (2023). Deep Spatio-Temporal Graph Network with Self-Optimization for Air Quality Prediction. *Entropy*, 25 (2), 247. <https://doi.org/10.3390/e25020247>
- Prins, M., O'Connell, T. M., Earthperson, A., Alzahrani, Y. A., Diaconeasa, M. A. (2023). Leveraging Probabilistic Risk Assessment and Machine Learning for Safety and Cost Optimization in HAZMAT Transportation. Volume 13: Research Posters; Safety Engineering, Risk and Reliability Analysis. <https://doi.org/10.1115/imece2023-114273>
- Hüllermeier, E., Waegeman, W. (2021). Aleatoric and epistemic uncertainty in machine learning: an introduction to concepts and methods. *Machine Learning*, 110 (3), 457–506. <https://doi.org/10.1007/s10994-021-05946-3>
- Karagulian, F., Barbieri, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F. et al. (2019). Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring. *Atmosphere*, 10 (9), 506. <https://doi.org/10.3390/atmos10090506>
- Concas, F., Mineraud, J., Lagerspetz, E., Varjonen, S., Liu, X., Puolamäki, K. et al. (2021). Low-Cost Outdoor Air Quality Monitoring and Sensor Calibration. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 17 (2), 1–44. <https://doi.org/10.1145/3446005>
- Lin, T.-Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., Dollar, P. (2017). Focal Loss for Dense Object Detection. 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2999–3007. <https://doi.org/10.1109/iccv.2017.324>
- Abdel-Mooty, M. N., El-Dakhakhni, W., Coulibaly, P. (2022). Data-Driven Community Flood Resilience Prediction. *Water*, 14 (13), 2120. <https://doi.org/10.3390/w14132120>
- Hamzah, F. B., Mohd Hamzah, F., Mohd Razali, S. F., Samad, H. (2021). A Comparison of Multiple Imputation Methods for Recovering Missing Data in Hydrological Studies. *Civil Engineering Journal*, 7 (9), 1608–1619. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091747>
- Liu, B., Qi, Z., Gao, L. (2024). Enhanced Air Quality Prediction through Spatio-temporal Feature Sxtraction and Fusion: A Self-tuning Hybrid Approach with GCN and GRU. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235 (8). <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07346-4>
- Chen, Y., Xie, Y., Dang, X., Huang, B., Wu, C., Jiao, D. (2024). Spatio-temporal prediction of carbon emissions using a hybrid deep learning model considering temporal and spatial correlations. *Environmental Modelling & Software*, 172, 105937. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105937>
- Krishnan, R., Shalit, U., Sontag, D. (2017). Structured Inference Networks for Nonlinear State Space Models. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 31 (1). <https://doi.org/10.1609/aaai.v31i1.10779>
- Li, Y., Yu, R., Shahabi, C., Liu, Y. (2017). Diffusion convolutional recurrent neural network: Data-driven traffic forecasting. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.01926>
- Akhmetov, B., Lakhno, V., Malyukov, V., Omarov, A., Abuova, K., Issaikin, D., Lakhno, M. (2019). Developing a mathematical model and intellectual decision support system for the distribution of financial resources allocated for the elimination of emergency situations and technogenic accidents on railway transport. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 97 (16), 4401–4411.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.343204

**ДЕКОМПОЗИЦІЯ СТАНЦІЇ МИЙКИ НА МІСЦІ ДЛЯ ОБ'ЄКТНО ОРІЄНТОВАНОГО КЕРУВАННЯ (с. 6–14)****Р. М. Міркевич, В. В. Полупан, О. М. Пупена, О. М. Клименко, О. М. Міркевич**

Об'єктом дослідження є станція СІР-мийки, яка використовується для автоматизованого миття технологічного устаткування у харчовій промисловості. Проблема, що розглядається в роботі, полягає у відсутності формалізованої методики декомпозиції станції СІР-мийки, яка б забезпечувала створення об'єктно-орієнтованих моделей керування відповідно до міжнародних стандартів.

У результаті дослідження розроблено методику декомпозиції станції СІР-мийки за принципами ІЕС 61512, що включає виокремлення рівнів технологічної комірки, технологічних вузлів, модулів устаткування та модулів керування. Показано, що такий підхід забезпечує структуроване відображення обладнання та його функцій, що забезпечує взаємодію технологічних етапів з обладнанням станції СІР-мийки.

Отримані результати пояснюються тим, що технологічний процес СІР-мийки має ієрархічну структуру і повторюваність процесу, що дозволяє формалізувати її у вигляді взаємопов'язаних рівнів – від технологічної комірки до окремих модулів устаткування. Така особливість забезпечує узгодженість між логікою процесу та фізичною структурою обладнання, що підвищує ефективність його керування. Особливістю результатів є поєднання апаратної ієрархії з інформаційними моделями, що відрізняє запропоноване рішення від традиційних описових методик. Це дозволяє не лише підвищити гнучкість і масштабованість систем керування, а й створює умови для формування бібліотек програмних об'єктів, придатних до повторного використання.

Практичне застосування результатів можливе в умовах промислових підприємств харчової, фармацевтичної та хімічної галузей, де використовуються станції СІР-мийки. Вони можуть бути інтегровані у сучасні SCADA/PLC-системи з використанням стандартів AutomationML та OPC UA, що забезпечує їх сумісність із MES/ERP-рівнями керування. Це підвищує ефективність експлуатації технологічного обладнання, знижує витрати на розробку та обслуговування систем автоматизації.

**Ключові слова:** СІР-станція, ІЕС 61512, об'єктно-орієнтоване керування, декомпозиція, технологічна комірка, технологічний вузол.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.343635

**ОПТИМІЗОВАНЕ АДАПТИВНЕ МАШИННЕ НАВЧАННЯ ДЛЯ ДИНАМІЧНИХ ПОТОКІВ ДАНИХ (с. 15–25)****Aivar Sakhipov, Aruzhan Mektepbayeva, Amangul Talgat, Maxot Rakhmetov, Ainagul Adiyeva, Altynbek Seitenov, Nurzhan Ualiyev, Shynar Yelezhanova**

Об'єктом дослідження є адаптивні системи машинного навчання, здатні обробляти великі обсяги швидкозмінних поточкових даних у режимі реального часу. Розглядається проблема підтримки точності прогнозування та обчислювальної ефективності за наявності дрейфу концепцій. Дрейф концепцій стосується переважування статичних моделей під час випробування стаціонарних моделей, а також зміни характеру базових розподілів. Адаптивна архітектура включає виявлення дрейфу концепцій, орієнтоване на дивергенцію редагувань, та інкрементне оновлення моделі за допомогою гіпервимірної статистичної кластеризації сегментів. Результати експериментів з використанням змодельованих та реальних наборів даних демонструють, що адаптивна архітектура підтримує точність прогнозування вище 0,83 у сценаріях різкого, поступового, рекурентного та безперервного дрейфу. Порівняно з неадаптивними моделями, затримка адаптації зменшується приблизно в 2,6 рази, а непотрібні операції перенавчання зменшуються до 40%. Ці результати можливі завдяки тому, що запропонована структура здатна перенавчати рішення тоді і тільки тоді, коли зміни розподілу визначені як статистично значущі та значущі для моделі. Це призводить до уникнення надлишкових обчислень для процесорів та забезпечення стаціонарної моделі в умовах відсутності дрейфу. Основний внесок полягає в тому, що інженерія ознак виконується з урахуванням дрейфу, порогове регулювання адаптується до зазначених розподілів, а механізми оновлення використовуються, що ефективно використовують ресурси в єдиному високопродуктивному потоковому конвеєрі. Архітектура добре працює в умовах різкого, поступового, періодичного та безперервного дрейфу та ефективна для застосувань у реальному часі, включаючи аналітику розумного міста, моніторинг кібербезпеки, роботи дорожніх систем та Інтернет речей для промислових систем.

**Ключові слова:** модель адаптації, обчислювальна продуктивність, виявлення дрейфу, потокова обробка, швидке оновлення.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.347656

**РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЕФЕКТИВНОСТІ СТРІЛЬБИ АРТИЛЕРІЇ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ РЕСУРСІВ БОЄПРИПАСІВ ТА ЗНОСУ СТВОЛІВ (с. 26–34)****М. В. Максимов, В. О. Болтънков, Є. В. Добринін, О. В. Сідельников**

Об'єктом дослідження є процес знищення окремих і групових цілей артилерійською батареєю в умовах обмеження боеприпасів заданої якості та різного ступеня зносу каналів стволів.

Визначено проблему відсутності кількісної моделі, яка дозволить оцінити ефективність прицільної або площинної стрільби при наявності ресурсних обмежень на постріли і знос каналів стволів, що дасть можливість визначати порогові умови доцільності продовження вогню.

Запропоновано дискретну стохастичну модель ефективності стрільби артилерійського підрозділу. Модель призначена для оцінки ефективності прицільної стрільби за умов обмеженого ресурсу якісних боеприпасів. Модель також враховує наявність у складі підрозділу гармат, у яких стволи мають різний рівень зносу. Запропоновано постріли з кожної гармати зі складу артилерійського підрозділу розділити на чотири різні класи, що враховує якість елементів пострілу: снаряд та металевий заряд, та стан стволу. Послідовні стани гармат артилерійського підрозділу запропоновано вважати елементами Марківського ланцюга. Встановлено, що можна досягти

коефіцієнта ефективності стрільби, що лежить в межах 0,63–0,83. Отримано граничну оцінку коефіцієнту ефективності стрільби артилерійського підрозділу по окремій цілі, яка дорівнює 0,5.

Результати дослідження показали, що при отриманні граничного значення коефіцієнту ефективності стрільби прицільна стрільба вироджується в площинне ураження цілі зі збільшеними еліпсами розсіювання. Такий стан речей веде до збільшення майже в два рази витрати пострілів і часу ведення вогню, що різко підвищує ризик контрбатарейного ураження батареї.

Отримання таких результатів стало можливим завдяки поєднанню прийнятої класифікації пострілів за якістю, врахування збільшеного зносу каналів стволів через зниження ймовірності влучання та аналізу множини реалістичних стратегій стрільби гарматами.

Модель можна запропонувати для виконання тактичних розрахунків при виборі режиму вогню, структури використання наявних боеприпасів і оцінювання доцільності переходу від прицільної до площинної стрільби.

**Ключові слова:** артилерійська батарея, обмежені ресурси, знос каналу ствола, коефіцієнт ефективності стрільби, порогові умови стрільби, контрбатарейне ураження.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.344643

### РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ МОНІТОРИНГУ ТА УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНИМИ РИЗИКАМИ ПРИ АВАРІЯХ З НЕБЕЗПЕЧНИМИ ВАНТАЖАМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ (с. 35–47)

О. В. Криворучко, Maira Shalabayeva, С. В. Цюцюра, М. І. Цюцюра, В. О. Макєдова, В. А. Лахно, О. В. Алексеєнко, Я. І. Шестах, А. А. Корчевська

Об'єкт дослідження – процес моніторингу та управління екологічними ризиками при аваріях на залізничному транспорті, що перевозить небезпечні вантажі.

Визначено проблему, яка полягає у відсутності єдиного, цілісного підходу до управління ризиками на транспорті, який би інтегрував методи просторово-часового прогнозування з формальною оцінкою невизначеності. Представлено математичну модель, яка дозволяє здійснювати обробку та аналіз даних, що надходять від мобільної автоматизованої системи моніторингу якості повітря (МАСМКВ). Викладені залежності сформували базу моделі машинного навчання та статистичного аналізу, що використовуються при роботі імітаційної моделі (ІМ) моніторингу та управління екологічними ризиками. Імітаційну модель на відміну від аналогічних розвинено в напрямках:

- 1) представлення даних і обробки пропусків;
- 2) побудови ймовірнісних карт ризику з урахуванням невизначеності і калібрування прогнозів стану забруднення навколишнього середовища на місці аварії;
- 3) адаптації моделі при варіативності даних на місці аварії;
- 4) багатокритеріальної оптимізації управлінських рішень.

У сукупності викладена у дослідженні імітаційна модель забезпечує особам, які приймають рішення, перспективу не тільки спрогнозувати ймовірність перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) забруднюючих речовин на залізничній інфраструктурі, але й сформувати довірчі карти ризику. На відміну від аналогічних рішень, розроблена модель є ML-орієнтованою. Тобто, передбачення рівня ризику побудовано в просторово-часовій постановці на графі залізничної мережі з урахуванням даних, що надходять від МАСМКВ. Адекватність моделі підтверджена досягненням показника площі під ROC-кривою ( $AUC = 0,990$ ), показника PR-аналізу ( $AP = 0,940$ ).

**Ключові слова:** імітаційна модель, управління екологічним ризиком, невизначеність, небезпечні вантажі, залізничний транспорт.