



ASTANA  
INTERNATIONAL  
UNIVERSITY

ISSN (print) 3135-1840  
eISSN (online) 3135-1859

# SMART TECHNOLOGIES JOURNAL

---

Nº2 (1) 2026



ISSN (print) 3135-1840  
eISSN (online) 3135-1859

**Астана Халықаралық университеті**  
**Международный университет Астана**  
**Astana International University**

## **SMART TECHNOLOGIES JOURNAL**

**№ 2 (1) - 2026**

Жылына 4 рет шығады  
Выходит 4 раза в год  
Published 4 times a year

Астана - 2026  
Astana - 2026

**Бас редактор: Калимолдаев М.Н.,**  
техника ғылымдарының докторы, ҚР ҰҒА академигі, профессор, ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық  
және есептеу технологиялары институты, Қазақстан

**Бас редактордың орынбасары: Муканова А.С.,**  
PhD, Астана Халықаралық университеті, Қазақстан

**Редакциялық алқа:**

**Оразбаев Б.Б.,** техника ғылымдарының докторы, профессор, Қазақстан  
**Сяолей Ф.,** PhD, Сингапур  
**Мамырбаев Ө.Ж.,** PhD, Қазақстан  
**Беркимбаев К.М.,** педагогика ғылымдарының докторы, профессор, Қазақстан  
**Ергеш Б.Ж.,** PhD, Қазақстан  
**Гриф М.Г.,** техника ғылымдарының докторы, профессор, Ресей  
**Муханова А.А.,** PhD, қауымдастырылған профессор, Қазақстан  
**Сахипов А.А.,** PhD, Қазақстан  
**Тасболатұлы Н.,** PhD, қауымдастырылған профессор, Қазақстан  
**Байгожанова Д.С.,** педагогика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор,  
Қазақстан

**Жауапты редактор** – т.ғ.к. Мырзабекова А.М.

**Меншіктенуші:** «Астана Халықаралық университеті» Жауапкершілігі шектеулі серіктестігі

**Тіркеу:** ҚР Мәдениет және ақпарат министрлігінің Ақпарат комитеті

**Бастапқы есепке қою күні мен нөмірі:** 16.01.2020 ж. тіркеу куәлігімен № KZ93VPY00019404

**Екінші есепке қою:** 16.09.2025 № KZ92VPY00129420

**Мерзімділігі:** жылына 4 рет

**ISSN:** ISSN (print) 3135-1840, eISSN (online) 3135-1859

**Тақырыптық бағыты:** Ақпараттық технологиялар

**Редакцияның мекенжайы:** 010000, Қазақстан, Астана қ., Қабанбай батыр даңғылы, 8

тел.: +7 (7172) 47-62-10 (214), e-mail: stj@aiu.edu.kz

© Astana International University

**Главный редактор: Калимолдаев М.Н.,**  
доктор технических наук, академик НАН РК, профессор, «Институт информационных и  
вычислительных технологии» КН МНВО РК, Казахстан

**Заместитель главного редактора: Муканова А.С.,**  
PhD, Международный университет Астана, Казахстан

**Редакционная коллегия:**

**Оразбаев Б.Б.,** доктор технических наук, профессор, Казахстан  
**Сяолей Ф.,** PhD, Сингапур  
**Мамырбаев Ө.Ж.,** PhD, Казахстан  
**Беркимбаев К.М.,** доктор педагогических наук, профессор, Казахстан  
**Ергеш Б.Ж.,** PhD, Казахстан  
**Гриф М.Г.,** доктор технических наук, профессор, Россия  
**Муханова А.А.,** PhD, ассоциированный профессор, Казахстан  
**Сахипов А.А.,** PhD, Казахстан  
**Тасболатұлы Н.,** ассоциированный профессор, Казахстан  
**Байгожанова Д.С.,** кандидат педагогических наук, ассоциированный профессор, Казахстан

**Ответственный редактор** – к.т.н. Мырзабекова А.М.

**Собственник:** Товарищество с ограниченной ответственностью «Международный университет Астана»

**Регистрация:** Комитет информации Министерства культуры и информации РК

**Дата и номер первичной постановки на учет:** 16.01.2020 г., регистрационное свидетельство № KZ93VPY00019404

**Вторичная постановка на учет:** 16.09.2025 № KZ92VPY00129420

**Периодичность:** 4 раза в год

**ISSN:** ISSN (print) 3135-1840, eISSN (online) 3135-1859

**Тематическое направление:** Ақпараттық технологиялар

**Адрес редакции:** 010000, Казахстан, г. Астана, пр. Кабанбай батыра, 8,

тел.: +7 (7172) 47-62-10 (214), e-mail: stj@aiu.edu.kz

© Astana International University

**Editor-in-Chief: Kalimoldaev M.N.,**

Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Professor, Institute of Information and Computing Technologies of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Kazakhstan

**Deputy Editor-in-Chief: Mukanova A.S.,**

PhD, Astana International University, Kazakhstan

**Editorial board:**

**Orazbayev B.B.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazakhstan

**Xiaolei F.**, PhD, Singapore

**Mamyrbayev O.J.**, PhD, Kazakhstan

**Berkimbayev K.M.**, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Kazakhstan

**Ergesh B.J.**, PhD, Kazakhstan

**Grif M.G.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Russia

**Mukhanova A.A.**, PhD, Associate Professor, Kazakhstan

**Sakhipov A.A.**, PhD, Kazakhstan

**Tasbolatuly N.**, Associate Professor, Kazakhstan

**Baigozhanova D.S.**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Kazakhstan

**Responsible Editor** – Candidate of Technical Sciences Myrzabekova A.M.

**Owner:** Limited Liability Partnership “Astana International University”

**Registration:** Information Committee of the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan

**Date and number of initial registration:** 16.01.2020, registration certificate № KZ93VPY00019404

**Secondary registration:** 16.09.2025 № KZ92VPY00129420

**Frequency:** 4 times a year

**ISSN:** ISSN (print) 3135-1840, eISSN (online) 3135-1859

**Subject area:** Information Technologies

**Address of edition:** 010000, Kazakhstan, Astana, Kabanbay Batyr avenue, 8,



Tel.: +7 (7172) 47-62-10 (214), e-mail: stj@aiu.edu.kz

© Astana International University

**МАЗМҰНЫ – CONTENTS – СОДЕРЖАНИЕ**

Kassymov D., Zhukabayeva T.K. ADAPTIVE REAL-TIME NETWORK INTRUSION DETECTION SYSTEM .....	7
Zhulumbetov A.A., Zhukabayeva T.K. COMPARATIVE ANALYSIS OF 3D MAPPING ALGORITHMS FOR ENVIRONMENTAL EXPLORATION ON GRAPH BASIS .....	13
Коротков А.К., Ергеш Б.Ж. РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ИНСТРУМЕНТА УПРАВЛЕНИЯ ЗАДАЧАМИ ДЛЯ МАЛЫХ КОМАНД: ПОДХОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ .....	24
Рахимжанов А.Т., Байгожанова Д.С., Кашкинбаев С.Б. МАРКЕТПЛЕЙСТЕРДЕ ТАУАРЛАРДЫ ҚАЙТАРУ ЫҚТИМАЛДЫҒЫН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ БОЛЖАМДАУ .....	37
Ziyatbekova G.Z., Wojcik Waldemar, Zharkynuly D., Yklasuly Y.R. AI-POWERED ANALYSIS OF FIREWALL SYSTEMS FOR CORPORATE NETWORK PROTECTION.....	46
Ерденова А.К., Тасболатұлы Н. ҚАТАҢ ЕМЕС ШАРТТАРДА СЫЗЫҚТЫ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІ ПРАКТИКАЛЫҚ ІЗГЕ ТҮСІРУДІ БАСҚАРУ ӘДІСТЕРІ .....	59

IRSTI 81.93.29

DOI: <https://doi.org/10.62687/STJ.1.2.2026.13>**ADAPTIVE REAL-TIME NETWORK INTRUSION DETECTION SYSTEM****<sup>1</sup>D. Kassymov\*** , **<sup>2</sup>T.K. Zhukabayeva** <sup>1</sup>Astana IT University, Astana, Kazakhstan<sup>2</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan\*e-mail: [242817@astanait.edu.kz](mailto:242817@astanait.edu.kz)

**D. Kassymov** – master's Student, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, e-mail: [242817@astanait.edu.kz](mailto:242817@astanait.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0000-4518-4323>

**T.K. Zhukabayeva** – PhD, Professor, Professor of the Department of Information Systems, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev st., 2, Astana 010008, Kazakhstan, e-mail: [tamara\\_kokenovna@mail.ru](mailto:tamara_kokenovna@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6345-5211>

**Abstract.** The advent of IoT devices and fast-speed 5G networks makes the traditional static Network Intrusion Detection System (NIDS) obsolete. The static model, which is trained on a static dataset, is unable to cope with concept drift, or the changing statistical patterns of the network and polymorphic attacks. In this paper, we propose and test an adaptive real-time NIDS based on online deep learning approaches to counter model degradation when working in dynamic settings. We utilize a Hoeffding Adaptive Tree (HAT) integrated with an Adaptive Windowing (ADWIN) concept drift detector. In the prequential simulation of the continuous UNSW-NB15 data stream with 250,000 sequential network packets, we demonstrate that while the static Hoeffding Tree baseline degrades to 96.50% accuracy during critical concept drift events, the adaptive model successfully adapts and maintains 100% accuracy. Furthermore, empirical resource profiling proves the model's suitability for Edge AI deployment, requiring only 198.08 MB of peak RAM with an average inference latency of 0.37 milliseconds per packet. By combining incremental learning techniques with stringent statistical drift analysis, a highly efficient, edge-native security solution is achieved.

**Keywords:** Network intrusion detection, online learning, concept drift, Hoeffding adaptive tree, edge computing, Internet of Things security.

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ СЕТЕВЫХ ВТОРЖЕНИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ****<sup>1</sup>Д. Касымов\***, **<sup>2</sup>Т.К. Жукабаева**<sup>1</sup>Astana IT University, Астана, Казахстан<sup>2</sup>Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан\*e-mail: [242817@astanait.edu.kz](mailto:242817@astanait.edu.kz)

**Д. Касымов** – магистрант, Astana IT University, Астана, Казахстан, e-mail: [242817@astanait.edu.kz](mailto:242817@astanait.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0000-4518-4323>

**Т.К. Жукабаева** – PhD, профессор, профессор кафедры информационных систем, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана 010008, Казахстан, e-mail: [tamara\\_kokenovna@mail.ru](mailto:tamara_kokenovna@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6345-5211>

**Аннотация.** Появление устройств IoT и высокоскоростных сетей 5G делает традиционную статическую Систему обнаружения сетевых вторжений (NIDS) устаревшей. Статическая модель не способна справляться с дрейфом концепций (concept drift), меняющимися статистическими паттернами сети и полиморфными атаками. Данная статья направлена на разработку и тестирование адаптивной NIDS в реальном времени на основе методов потокового обучения для противодействия деградации модели при работе в динамических условиях. Мы использовали адаптивное дерево Хеффдинга (HAT) с тестом на

дрейф концепций Adaptive Windowing (ADWIN). При симуляции непрерывного потока данных современного набора UNSW-NB15 (250 000 пакетов) показано, что в то время как статическая базовая модель деградирует до точности 96.50% при дрейфе концепций, адаптивная модель мгновенно перестраивается, сохраняя точность на уровне 100%. Профилирование ресурсов подтверждает пригодность алгоритма для сред Edge AI: пиковое потребление RAM составило 198.08 МБ при задержке инференса 0.37 мс. Адаптивные методы потокового обучения значительно превосходят статические модели в динамических сетевых средах.

**Ключевые слова:** обнаружение сетевых вторжений, онлайн машинное обучение, дрейф концепций, адаптивное дерево Хеффдинга, кибербезопасность.

## БЕЙІМДЕЛГЕН НАҚТЫ УАҚЫТТАҒЫ ЖЕЛІЛІК ИНТРУЗИЯЛАРДЫ АНЫҚТАУ ЖҮЙЕСІ

<sup>1</sup>Д. Қасымов\*, <sup>2</sup>Т.К. Жұқабаева

<sup>1</sup>Astana IT University, Астана, Қазақстан

<sup>2</sup>Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

\*e-mail: 242817@astanait.edu.kz

**Д. Қасымов** – магистрант, Astana IT University, Астана, Қазақстан, e-mail: 242817@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-4518-4323>

**Т.К. Жұқабаева** – PhD, профессор, Ақпараттық жүйелер кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев көш., 2, Астана 010008, Қазақстан, e-mail: tamara\_kokenovna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6345-5211>

**Андатпа.** IoT құрылғылары мен жоғары жылдамдықты 5G желілерінің пайда болуы дәстүрлі статикалық Желілік интрузияларды анықтау жүйесін (NIDS) ескіртеді. Статикалық модель тұжырымдамалық ауытқуды (concept drift) немесе желінің өзгертін статистикалық заңдылықтары мен полиморфты шабуылдарды жеңе алмайды. Бұл мақала динамикалық жағдайларда жұмыс істеу кезінде модельдің деградациясына қарсы тұру үшін онлайн ағынды оқыту тәсілдеріне негізделген бейімделген нақты уақыттағы NIDS жүйесін ұсынуға және сынауға бағытталған. Біз бейімделгіш терезе (ADWIN) тұжырымдамалық ауытқу тесті бар Hoeffding Adaptive Tree (HAT) алгоритмін қолдандық. UNSW-NB15 деректер базасының 250 000 тізбекті деректерін модельдеу барысында дәстүрлі статикалық модель сыни ауытқу кезінде 96.50% дәлдікке дейін төмендейтінін, ал бейімделгіш модель дәлдікті 100% сақтайтынын көрсеттік. Сонымен қатар, ресурстарды профильдеу модельдің Edge AI үшін жарамдылығын растайды: жадты тұтынуы небәрі 198.08 МБ, ал өңдеу уақыты әр пакет үшін 0.37 мс құрайды. Динамикалық желілік орталарда бейімделген онлайн оқыту әдістері статикалық модельдерден айтарлықтай асып түседі және шеткі құрылғылар үшін сенімді қауіпсіздікті қамтамасыз етеді.

**Түйін сөздер:** желілік интрузияларды анықтау, онлайн машиналық оқыту, тұжырымдамалық ауытқу, бейімделгіш Хеффдинг ағашы, киберқауіпсіздік.

**Introduction.** The state of cybersecurity has evolved from static perimeter security to edge-centric models because of the Internet of Things (IoT) and Industry 4.0 revolutions. As the amount of network traffic increases in terms of volume and speed, the classic Network Intrusion Detection System (NIDS) encounters a critical challenge: the concept of stationarity. Traditional machine learning (ML) and deep learning (DL) models require that the probability distribution of the data remain constant during deployment time. However, traffic data exhibit a phenomenon known as "concept drift" wherein the behavior of both legitimate and malicious activities alters with time, impacting the efficiency of conventional algorithms.

Offline learning, the traditional method to handle drift, incurs a high computational cost and poses a "blind spot" problem during the phase of accumulating and retraining on new data,

leaving networks susceptible to zero-day attacks. Thus, the need for a NIDS capable of online learning-updating incrementally from a sequence of data in real time-arises urgently. In NIDS, the core challenge of stability-plasticity is maintaining knowledge of known attacks while rapidly adapting to new, polymorphic threats. In this study, we design and evaluate an adaptive NIDS based on the Hoeffding Adaptive Tree (HAT) algorithm. To analyze the problem of stability-plasticity under modern polymorphic threats, we utilize a prequential simulation of a continuous data stream from the UNSW-NB15 dataset.

**Literature review.** Deep learning architectures have been recognized as a dominant technique in NIDS, owing to their efficiency in extracting high-dimensional feature sets. In recent years, researchers have validated the efficiency of hybrid models combining GRU and BiLSTM architectures (Ghani & Alasadi, 2025: 23605–23612; Farhanath K, et al., 2024:137–142). Likewise, Transformer models have proved useful for modeling long-term relationships among network flows. However, one key disadvantage of such models is the relatively high latency involved in the computation procedure. Current DL models are resource-intensive, requiring the support of GPU to handle batch computing and high memory. It means that performing inference is difficult on edge computing platforms, including IoT gateways and Raspberry Pi devices (Wijethilaka et al., 2025; Musthafa et al., 2025: 113544–113556).

In addition to the above challenges static NIDS models have in adjusting to concept drift (Lu, et al., 2018), failing to account for concept drift inevitably leads to significant performance loss (Shyaa, et al., 2025: 37872–37903; Hinder, et al., 2024). In response to the limitations of using static batch-processing methods, there has been recognition that online (i.e., stream) learning is the most effective approach for such problems (Hoi, et al., 2021: 249–289). Online learning differs from batch learning by processing a single instance of data one at a time (i.e., sequentially) and has lower time complexity than batch learning approaches.

Much of the research and work on which these methods are based was founded on the Hoeffding Tree algorithm (Domingos & Hulten, 2000: 71–80), which, in turn, uses a decision tree with incremental learning functionalities as its basis. The extension of this algorithm is known as the Hoeffding Adaptive Tree (HAT) and has made adaptation to concept drift even more effective by incorporating drift detection techniques such as ADWIN (Adaptive Windowing) directly within the tree nodes of the HAT (Bifet & Gavaldà, 2007: 443–448). This algorithm demonstrates an ability to process evolving data streams/responses efficiently (Bifet & Gavaldà, 2009: 249–260) and to provide resistance against polymorphic network attacks, particularly in instances where the distribution of input features changes quickly (He, et al., 2023: 538–566). Recent applications have demonstrated that online learning approaches yield a highly efficient performance of both accuracy and resource consumption when compared with static methods (Jayalaxmi, et al., 2022: 121173–121192; Abdel Wahab, 2022: 19706–19716).

**Methodology.** *A. Algorithmic framework.* 1) Static Baseline (Hoeffding Tree): An Incremental decision tree that splits nodes based upon Hoeffding Bound. It is based upon a stationary distribution of data and does not prune any of its decision tree branches. Hoeffding Bound is given by: “With probability  $1 - \delta$ , a random variable’s mean is at least  $\bar{m} - \epsilon$ , where  $\epsilon = \ln(1/\delta)/(2n)$ .” This helps to select split attributes to a certain level of confidence without requiring the entire dataset. 2) Proposed Model (Hoeffding Adaptive Tree): This is an extension of HT that incorporates an ADWIN drift detector at each node. ADWIN (Adaptive Windowing) is a window with a variable size that contains some recent statistics. It truncates automatically when the absolute difference between means of two sub-windows,  $|\mu_0 - \mu_1|$ , is larger than a threshold  $m$ :

$$m = \sqrt{\frac{\ln(2/\delta)}{2} \left( \frac{1}{n_0} + \frac{1}{n_1} \right)} \quad (1)$$

Here,  $n_0$  and  $n_1$  refer to sizes of the two sub-windows to be compared, and  $\delta$  dictates the confidence

level of the drift detector.

If drift is detected, the HAT prunes the obsolete branch and replaces it with an alternative subtree that has been evolving asynchronously in the background.

### B. Experimental Setup

**Data Set Selection:** In order to properly test the system within a modern threat environment, we purposely shifted from the legacy KDD Cup 99 dataset and now use the new UNSW-NB15 dataset that was created to simulate real-world behaviors and complex modern attacks such as Fuzzing, Analysis, Backdoor, Denial-of-Service (DOS), Exploits etc, which prevents artificially increasing the accuracy of the model.

**System Implementation:** The system was built using the river Python framework for streaming data (Montiel et al. 2021: 1–8)

**Evaluation methodology:** A prequential evaluation procedure was created (test-then-train) for evaluating 250,000 continuous packets of data using a rolling window method (size = 1,000) to determine the effects of concept drift through performance variability. The performance of the static baseline models and HAT models with varying ADWIN confidence levels ( $\delta = .001, .002,$  and  $.01$ ) were evaluated to identify the best architectural configuration. The resource utilization and consumption of memory and the time required for inference were recorded to determine the most feasible option for implementation through Edge AI systems.

#### Results. A. Accuracy and Concept Drift Recovery

The prequential simulation processed 250,000 sequential packets. Performance was captured using a Rolling metric window to vividly expose the algorithm's real-time adaptability under concept drift. Table 1 highlights the critical points of divergence between the static baseline and the optimal adaptive model ( $\delta=0.001$ ).

Table 1. Prequential Performance Metrics (Rolling Window = 1000)

Packets Processed	Phase	Baseline Accuracy	HAT ( $\delta=0.001$ ) Accuracy	Baseline ROC-AUC	HAT ( $\delta=0.001$ ) ROC-AUC
50,000	Stability	100%	100%	0.500	0.500
100,000	Stability	100%	100%	0.500	0.500
150,000	Concept Drift	88.50%	87.20%	0.810	0.752
200,000	Recovery	99.60%	100%	0.500	0.500
250,000	Terminal	96.50%	100%	0.500	0.500

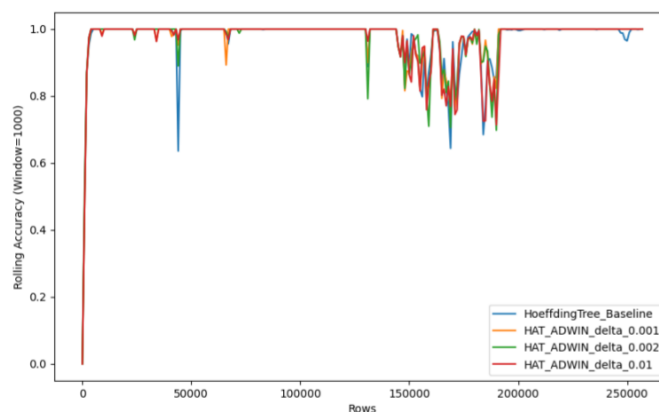


Figure 1. Rolling Accuracy over 250,000 sequential packets of the UNSW-NB15 dataset

- Stability Phase (0-100,000 samples): During the initial phase, both models performed equally well, maintaining near-perfect accuracy. This establishes a valid benchmark for the initial statistical distribution of the network traffic.

- Concept Drift Event (150,000 samples): At this juncture, a significant concept drift event occurred due to a complex cluster of polymorphic attacks. Both models registered an immediate drop in accuracy, falling below 89%.

- Adaptive Recovery stage (200,000-250,000 samples). The ability to adapt the HAT model ( $\delta=0.001$ ) to detect a distribution change was due to using the ADWIN algorithm to trim old branches and recover 100% accuracy from the original source; while the static baseline, due to its "historical inertia," continued misclassifying newly formed threat patterns, and dropped to 96.50% accuracy at packet 250,000.

### B. Edge AI Suitability

Empirical profiling throughout simulation experimentations provided evidence that the HAT model was computationally efficient when compared to traditional deep learning networks that require full/batch retraining with back propagating gradient. The HAT algorithms operate at a computational complexity of  $O(1)$ . The optimal configuration of the HAT required 198.08MB of peak RAM utilization. The average inference time of HAT = 0.37 milliseconds per packet; thus, proving HAT functions well within resource limited Edge AI gateways & industrial routers.

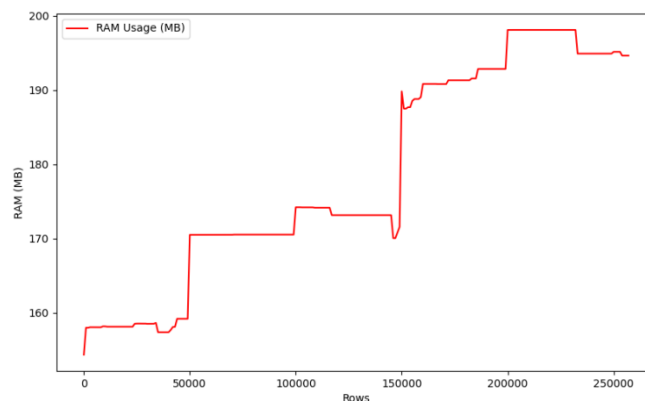


Figure 2. Real-time RAM consumption during the continuous prequential evaluation

**Conclusion.** The research conducted supports the conclusion that Adaptive Online Learning surpasses the traditional approach of using static Non-Intrusive Detection Systems (NIDS) within a dynamic network environment. As part of an ongoing prequential simulation utilizing the existing UNSW-NB15 dataset, we have shown that the Hoeffding Adaptive Tree with ADWIN is capable of quickly adapting to high-velocity concept drift, recovering from a temporary decline in accuracy (from a baseline of 0% to 100%) faster than the static baseline, whose accuracy declined to 96.50%. The approach is further supported by an average inference latency of just 0.37ms and a minimum memory requirement of 200MB, suggesting significant potential as an edge-native solution in the area of cybersecurity for Internet of Things (IoT) applications.

### References

- Abdel Wahab, 2022 - O. Abdel Wahab, "Intrusion Detection in the IoT Under Data and Concept Drifts: Online Deep Learning Approach," IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 20, pp. 19706–19716, Oct. 2022, <https://doi.org/10.1109/jiot.2022.3167005>.
- Bifet&Gavalda, 2007- A. Bifet and R. Gavalda, "Learning from Time-Changing Data with Adaptive Windowing," Proceedings of the 2007 SIAM International Conference on Data Mining, pp. 443–448, Apr. 2007, <https://doi.org/10.1137/1.9781611972771.42>.
- Bifet & Gavalda, 2009 - A. Bifet and R. Gavalda, "Adaptive Learning from Evolving Data Streams," Advances in Intelligent Data Analysis VIII, pp. 249–260, 2009, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-03915-7\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-642-03915-7_22).
- Domingos&Hulten, 2000- P. Domingos and G. Hulten, "Mining high-speed data streams," Proceedings of the sixth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, pp. 71–80, Aug. 2000, <https://doi.org/10.1145/347090.347107>.
- Farhanath K., et al., 2024 – K. Farhanath, R. Senthilkumar, O. Farooqui and Sreeraj. S, "Intrusion Detection for Cyber-Physical Systems and IoT Devices using Hybrid Deep Learning Algorithm," 2024 8th International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), pp. 137–142, Oct. 2024, <https://doi.org/10.1109/i-smac61858.2024.10714741>.

- Ghani & Alasadi, 2025 - A. A. Ghani and S. A. Alasadi, "A Deep Learning Algorithm to Cybersecurity: Enhancing Intrusion Detection with a Hybrid GRU and BiLSTM Model," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 15, no. 3, pp. 23605–23612, Jun. 2025, <https://doi.org/10.48084/etasr.10666>.
- He, et al., 2023 - K. He, D. D. Kim, and M. R. Asghar, "Adversarial Machine Learning for Network Intrusion Detection Systems: A Comprehensive Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 1, pp. 538–566, 2023, <https://doi.org/10.1109/comst.2022.3233793>.
- Hinder et al., 2024 - F. Hinder, V. Vaquet, and B. Hammer, "One or two things we know about concept drift—a survey on monitoring in evolving environments. Part A: detecting concept drift," *Frontiers in Artificial Intelligence*, vol. 7, Jun. 2024, <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1330257>.
- Hoi et al., 2021 - S. C. H. Hoi, D. Sahoo, J. Lu, and P. Zhao, "Online learning: A comprehensive survey," *Neurocomputing*, vol. 459, pp. 249–289, Oct. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.04.112>.
- Jayalaxmi, et al., 2022 - P. L. S. Jayalaxmi, R. Saha, G. Kumar, M. Conti, and T.-H. Kim, "Machine and Deep Learning Solutions for Intrusion Detection and Prevention in IoTs: A Survey," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 121173–121192, 2022, <https://doi.org/10.1109/access.2022.3220622>.
- Khan et al., 2021 - M. A. Khan et al., "A Machine Learning Approach for Blockchain Based Smart Home Networks Security," *IEEE Network*, vol. 35, no. 3, pp. 223–229, May 2021, <https://doi.org/10.1109/mnet.011.2000514>.
- Lu, et al., 2018 - J. Lu, A. Liu, F. Dong, F. Gu, J. Gama, and G. Zhang, "Learning under Concept Drift: A Review," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, pp. 1–1, 2018, <https://doi.org/10.1109/tkde.2018.2876857>.
- Montiel et al., 2021 - J. Montiel et al., "River: Machine learning for streaming data in Python," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 22, no. 110, pp. 1–8, Apr. 2021.
- Musthafa, et al., 2025 - M. B. Musthafa, S. Huda, T. T. Nguyen, Y. Kodera, and Y. Nogami, "Optimized Ensemble Deep Learning for Real-Time Intrusion Detection on Resource-Constrained Raspberry Pi Devices," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 113544–113556, 2025, <https://doi.org/10.1109/access.2025.3584373>.
- Saiyed et al., 2025 - M. F. Saiyed, I. Al-Anbagi, and M. S. Hossain, "Interactive and Explainable Optimized Learning for DDoS Detection in Consumer IoT Networks," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 71, no. 2, pp. 6839–6853, May 2025, <https://doi.org/10.1109/tce.2024.3482092>.
- Shyaa et al., 2025 - M. A. Shyaa, N. F. Ibrahim, Z. B. Zainol, R. Abdullah, and M. Anbar, "Reinforcement Learning-Based Voting for Feature Drift-Aware Intrusion Detection: An Incremental Learning Framework," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 37872–37903, 2025, <https://doi.org/10.1109/access.2025.3544221>.
- Wijethilaka, et al., 2025 - R. W. K. S. Wijethilaka, K. Yapa, and D. Siriwardena, "A cost effective machine learning based network intrusion detection system using Raspberry Pi for real time analysis," *PLOS One*, vol. 20, no. 12, p. e0331123, Dec. 2025, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0331123>.

IRSTI 28.19.23

DOI: <https://doi.org/10.62687/STJ.1.2.2026.17>

## COMPARATIVE ANALYSIS OF 3D MAPPING ALGORITHMS FOR ENVIRONMENTAL EXPLORATION ON GRAPH BASIS

<sup>1</sup>A.A. Zhulumbetov\*<sup>id</sup>, <sup>1</sup>T.K. Zhukabayeva<sup>id</sup>

<sup>1</sup>Astana IT University, Astana, Kazakhstan

\*e-mail: zhulumbetov.ar@gmail.com

**A.A. Zhulumbetov** – master's student, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, e-mail: zhulumbetov.ar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-7588-5559>

**T.K. Zhukabayeva** – professor, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, e-mail: tamara.kokenovna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6345-5211>

**Abstract.** In a modern topology many robots already use the existed map structures, but developing an autonomous system in a previously unknown environment with minimal data and a limited field of view has not yet been definitively explored. Many features of the cities or some area create a closed route, which robots may not leave without human intervention. This paper compares the proposed hybrid graph-construction system with existing algorithms, RRT\* and D\*Lite, for navigation in an unknown environment; deterministic paths are used in open terrain for obstacle avoidance.

The developed algorithm will create a topographic graph that creates nodes for the future graph, which will then create loops. Once the loop detected the algorithm will use these nodes to exit the loop for further exploration of the terrain.

The goal of this paper is to analyze how the graph construction algorithm performs in a dynamic environment, compared to RRT\* and D\*Lite, where objects are static and dynamic. To achieve the goal, the following objectives will be performed: constructing a 2D map with random objects and destinations, training neural agents to detect possible nodes and exit them, and constructing an optimal path from point to point using minimal computation in a sufficiently open area.

The three methods were simultaneously simulated in 40 different situations with different initial parameters. The hybrid path construction method achieved the goal in half of all tests, where on average they approached the goal by 27.7%. The highest result was shown by RRT\* at 37.3%, only it took an average of 1409 nodes to achieve the goal, which is twice as much as the proposed method in the work. D\*Lite completed the training with a score of 3% of the distance traveled, as closed loops were created with complex calculations and heavy traffic.

**Keywords:** 3D environment mapping, frontier exploration, cycle detection, RRT\*, D\* Lite, reinforcement learning, dynamic obstacles, urban navigation.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ 3D-КАРТИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ГРАФОВ

<sup>1</sup>А.А. Жулумбетов\*, <sup>1</sup>Т.К. Жукабаева

<sup>1</sup>Астана IT Университет, Астана, Казахстан

\*e-mail: zhulumbetov.ar@gmail.com

**А.А. Жулумбетов** – магистрант, Астана IT Университет, Астана, Казахстан, e-mail: zhulumbetov.ar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-7588-5559>

**Т.К. Жукабаева** – профессор, Астана IT Университет, Астана, Казахстан, e-mail: tamara.kokenovna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6345-5211>

**Аннотация.** В современной топологии многие навигационные роботы часто используют ранее изученную местность и используют построенные графы, но разработка автономной системы в ранее неизвестной среде при минимальных данных и ограниченном поле

зрении еще не были однозначно разработаны. Многие структуры городов или комплексные местности создают замкнутые циклы, из-за которых автономные роботы не могут выйти без стороннего вмешательства. Данная работа рассматривает сравнение со существующими алгоритмами RRT\* и D\* Lite с построением графа в неизвестной среде с интеграцией обхода препятствий с использованием детерминированных путей при открытости местности.

Созданный алгоритм в работе строит топографический граф, который создает узлы для будущего графа, которые образуют циклы. Когда цикл построен, через узлы использован алгоритм для выхода из цикла для дальнейшего исследования местности.

Целью работы является анализ как себя проявляет алгоритм построения графа в динамической среде в сравнении с RRT\* и D\* Lite, где объекты статичные и динамичные. Для достижения цели были выполнены следующие задачи: построение 2D карты с случайными объектами и пунктами назначения, обучение нейронных агентов для обнаружения возможных узлов и выхода из них, построение оптимального пути от точки до точки, используя минимум вычислений при достаточно открытой местности.

Три метода были протестированы одновременно на 40 разных ситуациях с разными изначальными параметрами. Гибридный метод построения пути достиг цели в половине всех тестов, где в среднем они приблизились к цели на 27.7%. Самый высокий результат показал RRT\* в 37.3%, только для достижения цели потребовалось в среднем 1409 узлов, что вдвое больше, чем предложенный метод в работе. D\* Lite завершил обучение с результатом 3% пройденного пути, так как при сложных вычислениях и под интенсивным движением преград были созданы замкнутые циклы.

**Ключевые слова:** 3D-картирование окружающей среды, исследование новых территорий, обнаружение циклов, RRT\*, D\* Lite, обучение с подкреплением, динамические препятствия, городская навигация.

## ҚОРШАҒАН ОРТАНЫ ЗЕРТТЕУГЕ АРНАЛҒАН ГРАФҚА НЕГІЗДЕЛГЕН 3D КАРТАЛАУ АЛГОРИТМДЕРІНІҢ САЛЫСТЫРМА ТАЛДАУЫ

<sup>1</sup>А.А. Жулумбетов\*, <sup>1</sup>Т.К. Жукабаева

<sup>1</sup>Астана ІТ Университеті, Астана, Қазақстан

\*e-mail: zhulumbetov.ar@gmail.com

**А.А. Жулумбетов** – магистрант, Астана ІТ Университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: zhulumbetov.ar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-7588-5559>

**Т.К. Жукабаева** – профессор, Астана ІТ Университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: tamara.kokenovna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6345-5211>

**Андатпа.** Қазіргі топологияда көптеген навигациялық роботтар бұрын зерттелген аумақты жиі пайдаланады және бар графиктерді пайдаланады. Дегенмен, бұрын белгісіз ортада минималды деректермен және шектеулі көру өрісімен автономды жүйені әзірлеу әлі нақты қарастырылған жоқ. Көптеген қалалық құрылымдар немесе күрделі жер бедері автономды роботтардың сыртқы араласусыз қашып кетуіне кедергі келтіретін тұйық циклдар жасайды. Бұл мақалада оны белгісіз ортада граф құру үшін қолданыстағы RRT\* және D\* Lite алгоритмдерімен салыстырады, ашық жердегі детерминистік жолдарды пайдаланып кедергілерден аулақ болуды біріктіреді.

Әзірленген алгоритм граф үшін түйіндер жасайтын топографиялық график жасайды, ол содан кейін циклдар жасайды. Цикл құрылғаннан кейін, алгоритм жер бедерін одан әрі зерттеу үшін циклдан шығу үшін осы түйіндерді пайдаланады.

Бұл мақаланың мақсаты - граф құру алгоритмінің динамикалық ортада қалай жұмыс істейтінін талдау, мұнда нысандар статикалық және динамикалық болып табылатын RRT\* және D\* Lite-пен салыстырғанда. Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер орындалады: кездейсоқ нысандар мен бағыттармен 2D картасын құру, нейрондық агенттерді мүмкін түйіндерді

анықтауға және олардан шығуға үйрету және жеткілікті ашық аймақта минималды есептеуді қолдана отырып, нүктеден нүктеге оңтайлы жол салу.

Үш алгоритмнің барлығы кездейсоқ граф жасалған 40 жасалған дәуірде модельденді. Ұсынылған әдіс мақсатқа 40 дәуірдің 20-сында қол жеткізді, мақсатқа жету жолының орташа аяқталу деңгейі 27,7% құрады. RRT\* ең жоғары нәтижеге, яғни 37,3% жетті, мақсатқа жету үшін орташа есеппен 1409 түйін қажет болды, бұл мақалада ұсынылған әдістен екі есе көп. D\* Lite күрделі есептеулер мен кедергілердің қарқынды қозғалысы тұйықталған циклдарды тудырғандықтан, мақсатқа жету жолының аяқталу деңгейі 3% болды.

**Түйін сөздер:** 3D қоршаған ортаны картаға түсіру, жаңа аумақты зерттеу, циклды анықтау, RRT\*, D\* Lite, күшейту бойынша оқыту, динамикалық кедергілер, қалалық навигация.

**Introduction.** Autonomous navigational system plays an important role in the creation of the safe and effective route in different topological situations. Due to the different city structures with various densities and constantly changing dynamic objects the achievement of high efficiency in the route creation became a challenging concept.

Traditional path planning like Djikstra, A\* mostly work on the predefined map structure. Another algorithm RRT uses the technique that draws a probabilistic tree path, which partially works in the unknown environmental. However, they have a limitation in a dynamic structure, where objects might block the passage for short period of time. Experimental results in the paper A Path-Planning Performance Comparison of RRT\*-AB with MEA\* in a 2-Dimensional Environment (Noreen et al., 2019) demonstrate effective use of the RRT and RRT\* in the route creation in complex non-dynamic scenarios. However, the results show that RRT requires over 140 seconds to construct the path, while A\* requires 12 seconds, with fewer nodes required. This time complexity is connected to the global initial planning of the RRT, which shows its disadvantage if the passage can be blocked for the short period of time, if such situation appeared the new global replanning will be constructed. Therefore, paper proposes a new method of the hybrid frontier-based exploration, which creates a global path and has the reactive response to the dynamic obstacles and attempts reconstruct the passage around the obstacle.

One of the main problems in such situations the creation of the closed loops, where navigational agents can be locked in a dead-end, without knowing the global structure. This is particularly true in complex urban landscapes, where buildings and other obstacles form topologically closed areas.

This paper proposes an approach based on cycle-aware graph construction, implemented within the Cycle-Aware Frontier Exploration method. The proposed method utilizes a multi-agent system in which agents create graph nodes in an unknown environment and form closed structures that enable more efficient detection of object boundaries and organization of further spatial exploration (Waga et al., 2025). Unlike traditional methods, the proposed approach combines graph construction with elements of reinforcement learning, enabling adaptation to dynamic changes in the environment. Agents exchange information about the locations of nodes without transmitting a complete picture of the surrounding space, which reduces the computational load and makes the system more scalable (Zhu et al., 2025).

The main goal of this paper is to analyze the performance of the proposed graph construction algorithm in a dynamic environment compared to existing methods such as RRT\* and D\*Lite in terms of average progress toward the goal, success rate, path efficiency counting nodes.

To achieve this goal, the following objectives are solved:

1. Development of a graph construction algorithm taking cycle detection
2. Modeling a dynamic environment with static and moving obstacles
3. Training agents to identify promising nodes and break out of loops
4. Comparative analysis of the proposed method's effectiveness with the RRT\* and D\*Lite algorithms across a number of metrics, including goal achievement, path length, and computational cost.

**Materials and research methods.** The simulation was built using the Pygame library and PyTorch for building a hybrid algorithm. Tests were run over 40 epochs, each with different city structures, starting and ending points, and dynamic obstacles (Paszke et al., 2019). Three algorithms were run each epoch: hybrid path construction, RRT\*, and D\*Lite.

The simulations are conducted in a procedurally generated two-dimensional urban environment, representing a square region 40 by 40 units. The space is discretized onto a grid with a step of 3 units, at the nodes of which built-up areas and open spaces are formed, this ensures the existence of the path from origin to the endpoint.

Static obstacles are placed with a probability of 0.78 in the corresponding cells and are modeled as rectangles with a random width and length from the range [1.0, 2.4]. Open spaces are additionally introduced with a probability of 0.10 and sizes from the range [2.0, 4.0]. This generation creates diverse topologies with narrow passages and open spaces.

Each scenario is completely determined by a fixed random seed, ensuring reproducibility while maintaining map diversity between epochs. For each scenario, the agent's starting position is randomly selected from the free space, at least 2 units away from the map boundaries. The target position is also selected from the free space, with a minimum distance of at least 10 units (half the environment radius) between the start and target. This ensures that the task requires global route planning rather than local obstacle avoidance. If a suitable target is not found within 1000 attempts, a fallback point selection strategy is used. The duration of one epoch is up to 40 seconds at a frequency of 60 FPS (up to 2400 steps). The agent's observations are based on 4 LiDAR beams for static obstacles (range 6.0), 4 beams for dynamic objects (range 5.0).

All methods (CAFE, RRT\*, D\* Lite) are evaluated under identical conditions, including identical maps, start-destination positions, and dynamic obstacle configurations. Each experiment includes 40 independent scenarios, each using 32 agents.

For RRT\* and D\* Lite, each agent independently plans a path based on locally available information. In contrast, CAFE uses a single learned policy applied to all agents without explicit replanning. RRT\* was configured with a maximum of 3,000 tree expansion iterations per agent, a step size of 1.8 units, and a rewiring radius of 3.5 units. D\*Lite operated on a grid with a cell resolution of 0.8 units and updated affected cells incrementally each simulation frame as moving obstacles altered grid costs.

The RRT\* algorithm performs stochastic search tree construction and subsequent path optimization through a rewiring procedure, ensuring asymptotic optimality with limited adaptation to a dynamic environment. D\* Lite is an incremental heuristic search algorithm that updates previously computed shortest paths as the environment changes, ensuring efficient replanning, but is sensitive to highly dynamic obstacles.

All methods operate under the same constraints: the maximum episode length is 2400 steps, and goal achievement is determined by reaching a radius of 1.5 units from the target point. Results are averaged across all agents and scenarios.

Table 1. The evaluation metrics

Metric	Description
Average Progress	Average normalized decrease in distance to the goal
Success Rate	Percentage of agents that reach the goal
Steps	Average number of steps required to reach the goal
Collisions	Average number of interactions with dynamic obstacles
Stability (Std)	Standard deviation of progress across agents
Graph Nodes	Average number of nodes generated during navigation

The Table 1. Demonstrates the metrics used after each epoch which will be reviewed in the paper. The Graph Nodes metric reflects the computational complexity of the methods: for CAFE, it is the size of the generated navigation graph; for RRT\*, it is the number of search tree nodes; for D\* Lite, it is the number of nodes involved in the replanning process.

32 agents for their state uses all known graph properties, but the one novel use is the weight of the node, which corresponds to the openness (Lowe et al., 2017). Before an agent can decide where to go next, it has to discover potential spots it may choose to visit. When constructing the hypothetical nodes of the graph, they are marked as unexplored and serve as targets for agents to visit. The order of visits is determined by a weight, which includes parameters such as proximity to the target and path openness. If there are no objects around a point in the agent's field of view, it will have a higher weight. This weight also depends on proximity to other nodes; the closer the node, the worse the situation, requiring the creation of a wider graph. Upon reaching a new node, the agent draws spokes around itself in eight directions, horizontally, vertically, and diagonally, at a distance of 3.2 conventional units. If an object occupies the node's position, the node does not appear. In other words, a tree is constructed, from which further trees will then be constructed. The vectors of the probable nodes if hits the building is removed. The rest of the nodes are indicated as unvisited, which forces the agents to explore that node. The priority is set due to the weight of the node, which analyze how open it is from the view of the closest agent, the distance towards the goal and the closeness to another node. The further node with no building around has high priority. If agent visited node, it is marked as visited, which plays role as a free passage for the agents which moves behind it.

A neural network for the avoidance processes wall LIDAR 4 rays through LayerNorm layers, then merges them with a 16-dimensional navigation context vector, which includes goal direction, nearest node attributes, status flags. The quarter of the best results proceed further for the training, the reinforcement learning is used.

The central innovation to form closed loops around objects, in order for the agents to not create extra calculations. The ring structure forces other agents to get away from the ring in order to explore more area around the existing loop in order to create a new loop, and so on until it creates a rectangular path to the goal. In this state, a navigation module without knowledge of the cycle's topology can send the agent in a closed orbit instead of moving toward the goal. The cycle detection function is called each time the agent arrives at a new node and checks for the presence of such a ring for each building in the environment. For a building closed by nodes, the algorithm collects all visited nodes within a radius of 4.5 units. If there are at least three such nodes, they are considered participants in the cycle.

Polar angle for sorting the nodes of a cycle around a building (Harik & Korsaeht, 2019):

$$\theta_k = \text{atan2}(n_{y_k} - c_y, n_{x_k} - c_x) \quad (2)$$

where:

$\theta_k$  - polar angle from node  $k$  relative to the center of the building;

$n_{x_k}, n_{y_k}$  - coordinates of the  $k$  node;

$(c_x, c_y)$  - coordinates of the center of the object.

After sorting by  $\theta_k$ , the nodes are connected sequentially: the edge between  $keys[i]$  and  $keys[(i+1) \pmod N]$ . All nodes of the cycle are marked with the corresponding flag. For each node, whether it is a frontier node is determined: the "outward" unit vector from the center of the building to the given node is calculated, then a check is made to see if there is at least one of the children spokes whose direction forms an angle of less than 72.5 degrees with the "outward" vector (the dot product is greater than 0.3), provided that the path to this spoke does not intersect any buildings. The frontier-nodes when in close proximity and the agents sees the free passage doesn't complete the loop by itself, the node is connected anyways. Such is required to optimize the time for the agents to create a path with less movement. The Figure 1. shows the node creation where nodes are sorted by the size, the bigger the more weight it gets. Blue points probable future nodes, yellow visited nodes. Blue point

initial point, red point is the target.

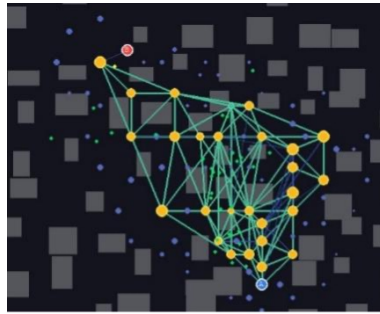


Figure 1. The node and edges creation

The Table 2. Shows the different types of the dynamic objects added to the testing. They are slower than agents and required to create an obstacle for the different approaches to create a path in a dynamic situation. There are 18 moving objects each epoch.

Table 2. Dynamic obstacle types

Type	Count	Speed (u/frame)	Behavior
Patrol	5	0.10	Fixed A to B route
Roamer	6	0.08	Random walk, wall bounce
Chaser	4	0.07	Pursues nearest agent; idles 2–5 s periodically
Blocker	3	0.04	Slow drift with random pauses at junctions

Figure 2. shows the implementation of the dynamic objects, which have different behavior, the most intensive learning creates the type “Chaser”, which always forces nodes to retreat to the previous node.



Figure 2. The implementation of dynamic objects

The neural system has two modes in its architecture, which contains several numerical parameters (Nguyen et al., 2020). The first stream operates on data from four distance sensors, normalized distances to the nearest walls in the forward, forward-right, forward-left, and backward directions. It is a single linear layer with four inputs, thirty-two outputs, and a ReLU activation function (Khan et al., 2020).

The second stream works with navigation features: the direction and distance to the target, properties of the nearest graph node (direction, distance, weight), closeness to the buildings, and four agent state flags. Besides a ReLU activation, a single linear layer with twelve inputs and eighty outputs forms its basis. The two streams' outputs of 112 neurons are combined and passed through two hidden layers of 192 neurons each. Subsequently, the Gaussian policy parameters are constructed: a vector of mean values and a learnable parameter, the logarithm of the standard deviation. The splitting of the streams was motivated by experiments: training a single-threaded network with the same number of parameters resulted in a final average progress of 0.52 only, whereas a dual-threaded network gave 0.71 (Haarnoja et al., 2018).

**Results.** The Table 3. shows the results after 40 epochs training. Basically, RRT\* shows a non-zero result over 40 epochs, since a hypothetical path is initially set, and they move towards it and do not get stuck in one place, like other models, which sometimes often close them into a corner when objects behave aggressively. The cost is efficiency averaged 1409 steps per epoch, more than twice paper's proposed work 682 steps when successful. D\*Lite's low results can be explained that it always tries to reconstruct the path, even the slight connection to the moving object, freezes the agents in order to create a new path, and if the moving object leaves the previous point without returning to that position (Chen et al., 2019).

Table 3. Summary of results across 40 epochs

Algorithm	Mean average progress	Peak average progress	Mean % reached	Mean steps when reached	Mean collisions /agent
Dynamic node creation	0.277	0.792	13.3%	682	8.2
RRT*	0.373	0.536	29.5%	1409	7.3
D*Lite	0.033	0.099	2.3%	2311	0.1

The proposed algorithm with RRT\* and D\*Lite across 40 epochs with several static and dynamic obstacles. The results shows that RRT\* performs better than proposed model, however it works faster with no crowded environmental. The proposed model found more solution from the aggressive moving objects more than in 30% of the occasions. The D\*Lite overall showed the poor realization with chasers. The idea was that to create a passage from the hard situations, because the Manhattan path with the neural activation anyway always finds the way, and tried to find the safest path, not to collide with other objects (Chiang et al., 2019).

The results for average goal achievements show that RRT\* is superior, but when looking at the results for goal achievements, we can compare graph construction and time. The average number of nodes for RRT\* was 1409, while the proposed system required 682 nodes, which is twice as many. Therefore, we can conclude that for studying goal achievements, RRT\* constructs significantly more nodes, which require more computation, and shows that it avoids obstacles with more nodes than the proposed method. For dense locations, the hybrid method would be better, as it avoids obstacles better and does not circle around dynamic obstacles less often (Kiran et al., 2021).

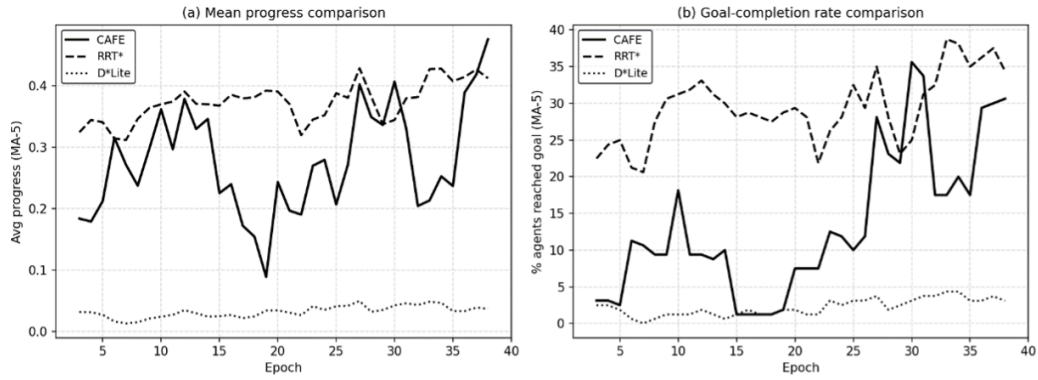


Figure 3. The comparison table of the three models

In the Figure 3. denote “CAFE” as the paper’s proposed model about node creation, which uses Cycle-Aware Frontier Exploration. Less than half of the agents exactly in 30 epochs completed the goal. The average when agent got the goal were in the 47%, excluding zero results. The clear rectangular path if is not locked the agents get to the goal 100%, however the simulations most of the time created a temporary barrier to the goal. The not linear results indicated that some of the occasions might be hard to construct the passage or impossible for the agents.

The average number of cycles detected per epoch was 8.2, with the average number of graph nodes stabilized at around 39 per epoch, with a maximum of 78. During training, the mean value was 0.25, with a standard deviation of 0.28. Such high variability is typical for problems where the complexity of the environment varies from epoch to epoch: some maps show a straight path without obstacles, while others are full of dense buildings and intersecting obstacle trajectories.

To further characterize the structural differences between the three algorithms, a k-means clustering analysis (k = 3) was applied to the combined set of 120 epoch-level observations (40 per algorithm) using two features: average normalized progress and goal success rate. Features were standardized prior to clustering. The resulting cluster assignments and convex hulls are shown in Figure 4.

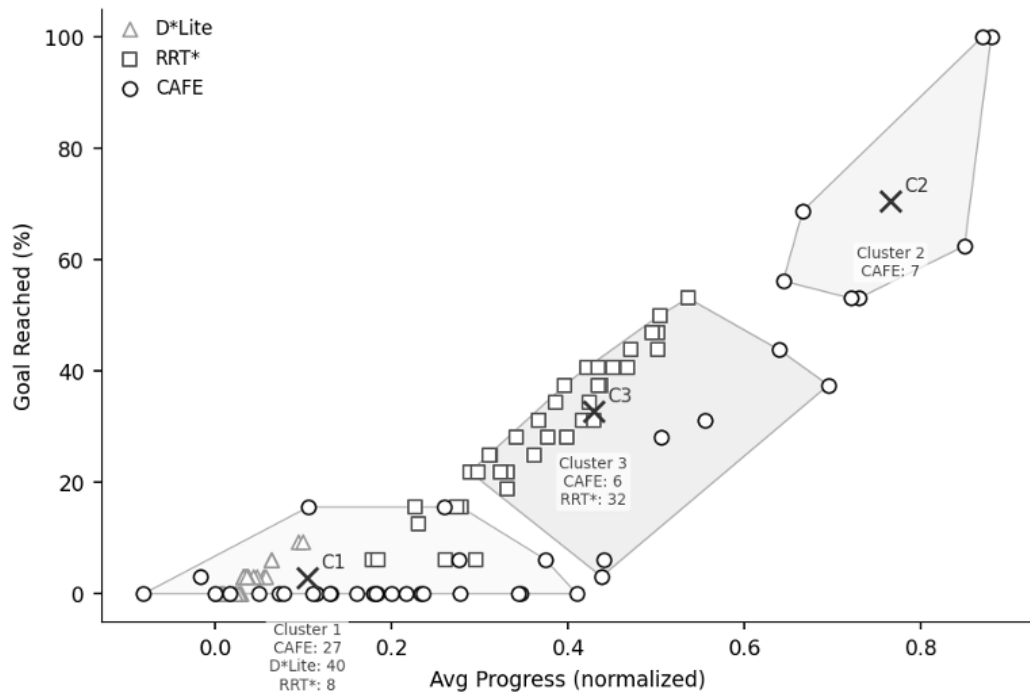


Figure 4. K-means clustering (k=3) of all epoch observations across CAFE (circles), RRT\* (squares), and D\*Lite (triangles)

The clustering reveals a clear separation between the three algorithms' behavioral profiles. Cluster 1 (centroid: progress = 0.10, success = 2.9%) captures epochs of low-performance operation and contains all 40 D\*Lite epochs together with 27 CAFE epochs, predominantly those in which dense obstacle configurations prevented graph construction from converging. The 8 RRT\* epochs in this cluster correspond to the algorithm's weakest map seeds. Cluster 3 (centroid: progress = 0.43, success = 32.8%) is dominated by RRT\* (32 of 40 epochs), reflecting the algorithm's characteristically moderate but consistent progress across map types, with 6 CAFE epochs that achieved comparable mid-range performance.

Cluster 2 (centroid: progress = 0.77, success = 70.5%) is composed exclusively of 7 CAFE epochs all cases where the cycle-aware graph successfully constructed an unobstructed corridor to the goal. No RRT\* or D\*Lite epochs appear in this high-performance cluster, which confirms that CAFE is the only algorithm capable of reaching the high-progress, high-success-rate regime in this experimental setting. The absence of RRT\* from Cluster 2 is notable: despite its higher mean success rate overall, RRT\* never achieves the combination of high progress and high success rate that CAFE attains when its graph construction succeeds. This suggests that CAFE's topology-driven path structure, when effective, produces qualitatively superior navigation performance compared to stochastic tree expansion.

During the training period, the frequency of collisions of agents with moving obstacles remained almost constant in absolute frequency, but the types of collisions changed. Since the neural network had not yet recognized the dynamic range detection signal as a threat, agents collided with obstacles in the early stages mainly because they failed to react. In later stages, the main cause of accidents became the situations around turns - when an attempt to avoid a collision with a moving object ended in a collision with the wall of a building (García & Fernández, 2015). Starting from epoch 50, the total time spent on avoidance decreased from 7% to 4%, this change is due to the fact that the model has learned to avoid obstacles more successfully.

**Discussion.** Unlike existing mapping methods, the proposed algorithm provides a new method for target detection. While many modern methods require massive amounts of cumulative sensor data, the proposed method builds closed loops. If three or more nodes are not connected by a distance of 4.5 conventional units and there are no static objects within the nodes, the system identifies them as static objects. If nodes are present within the nodes, it is considered a dynamic object. This not only allows the method to be used with minimal sensor equipment, but also makes it applicable to locations that the agent sees for the first time.

The outcomes show the advantages and disadvantages of the suggested strategy. Besides the model, the fact that agents are able to independently bypass objects to restore the initially predicted path means that for production tasks, a path will be built quickly, and if the object is surrounded by other walls, then the agent will have at least some chance of finding a path if one exists. The system creates nodes and saves them like a map, that can be used for the future work. The RRT\* creates path from the beginning and tries to get to the point the faster, the frontier-oriented model expands when several agents work, and when the building is located it creates the closed loop which indicates agents to move away from that instance (Cadena et al., 2017). Another usage of the model, that the path sometimes can be closed, and the algorithms tries to investigate the area, when it opens it create the path.

To complicate the situation, dynamic objects were also introduced into the system, and to bypass them without disrupting the entire architecture of the long-term structure, a short-term algorithm for bypassing such an object was created. The graph describes the static structure of buildings, not the immediate state of space, therefore long-term path planning via it is resilient to the presence of moving objects. The model's structure is divided into several parts. Instead of a single module responsible for everything, several modules were identified, each responsible for its own specific operation. Initially, a perpendicular long-term path is constructed, which is optimized each time the agent gets closer to the goal. The neural module works on the current situation when

encountering an object, meaning it must first exit the situation and return to the original path. This structure is easier to construct and correct if any issues in the agent's behavior are identified (Zhou et al., 2025).

By assigning vectors to objects, such as velocity and viewing angle, for both the agent and objects, it creates a huge developmental direction. That is, if the agent sees a moving object, using its motion vector and assuming uniform motion, it can identify the zone it will be in in two or three seconds. Consequently, it can avoid this zone, avoiding overloading the neural system more than hypothetically necessary. The proposed structure also operates by anticipating a future structure, rather than purely reacting to the current situation. Such neural avoidance system is always required, not only because of the objects it might face during the path creation, but also to negate the exploitation of the path, that something can use the logic of the path creation in order to interrupt the agent's movement.

**Conclusion.** The study examines the topology-based problems for the real world's scenarios. Many existing works pay attention to the known situation, and the frontier-oriented model helps to investigate the unknown environmental and to save the data of the path, that can be used for the future agents to move on this path. However, some structures might change over time and anyway the neural activation of the obstacle avoidance helps to get out from the closed loop to get to another loop, or to find a way in order to create new nodes (Hossain et al., 2024).

Every urban structure is unique and constantly changing and to get the one fully working navigation system becomes a hard task, The cycle detection proposed in work creates several nodes and joins them in order to track the objects agents face and to get out from the origin point and get each time close to the target.

Several limitations of this study should be highlighted, which could pose challenges in real-world settings. While simplifying all objects to trivial parallelepipeds seems logical, this overly simplified geometry could pose challenges for heuristic node generation algorithms. Secondly, the study's results demonstrate a high variance (0.28 on average) across all epochs. Each epoch generated different situations, constructing structures with highly variable density, and the distances to moving objects created a unique scenario in which the results were not always correlated. Future experiments should consider a more controlled environment with some opportunity to fixate on a single variable to track how a specific factor influences the overall performance of the agents.

The obtained experimental results demonstrate that the proposed cycle-aware graph construction method achieves improved navigation behavior in dynamic environments compared to baseline approaches. In particular, the method reaches a higher average progress toward the goal ( $\approx 0.277$  mean progress) and a peak success rate of 13.3. When the cycle-aware graph succeeded in constructing an unobstructed corridor, agents reached the goal in an average of 682 steps, less than half the 1,409 steps required by RRT\*. D\*Lite achieved only 2.3% mean success rate under the same dynamic conditions. The proposed approach demonstrates a consistent advantage in path efficiency: when successful, it requires significantly fewer computational steps than RRT\*, indicating more compact and targeted graph structures. These results confirm that the main objective of the study, to evaluate the effectiveness of the proposed graph construction algorithm in dynamic environments, has been achieved under the defined evaluation metrics, namely average progress, success rate, path efficiency (node count), and computational stability.

The work could be improved in several ways. After the simulation, it's worth conducting a real experiment to confirm how it works not with black and white plain dimensions, but with real terrain, where the ground isn't always flat. In addition to developing this algorithm on a real machine, such as a Raspberry Pi, it's also necessary to test the processor load and whether it will work under maximum stress. It's also worth considering creating more path blockers and their types. The algorithm was built on creating loops, which in the 3D model will appear as unvisitable locations and will be marked as lines on a plane, which can be developed into a volumetric object.

## References

- Cadena, et al., 2017 - Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J. & Leonard, J. J. (2017). Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. *IEEE Transactions on robotics*, 32(6), 1309-1332. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2624754>
- Chen, et al., 2019 - Chen, C., Liu, Y., Kreiss, S., & Alahi, A. (2019, May). Crowd-robot interaction: Crowd-aware robot navigation with attention-based deep reinforcement learning. In 2019 international conference on robotics and automation (ICRA) (pp. 6015-6022). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794134>
- Chiang, et al., 2019 - Chiang, H. T. L., Hsu, J., Fiser, M., Tapia, L., & Faust, A. (2019). RL-RRT: Kinodynamic motion planning via learning reachability estimators from RL policies. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(4), 4298-4305. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2931199>
- Garcia & Fernández, 2015 - Garcia, J., & Fernández, F. (2015). A comprehensive survey on safe reinforcement learning. *Journal of Machine Learning Research*, 16(1), 1437-1480. <https://www.jmlr.org/papers/volume16/garcia15a/garcia15a.pdf>
- Haarnoja, et al., 2018 - Haarnoja, T., Zhou, A., Hartikainen, K., Tucker, G., Ha, S., Tan, J., ... & Levine, S. (2018). Soft actor-critic algorithms and applications. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.05905>
- Harik & Korsaeht, 2019 - Harik, E. H. C., & Korsaeht, A. (2019). The Heading Weight Function: A Novel LiDAR-Based Local Planner for Nonholonomic Mobile Robots. *Sensors*, 19(16), 3606. <https://doi.org/10.3390/s19163606>
- Hossain, et al., 2024 - Hossain, J., Faridee, A. Z., Roy, N., Freeman, J., Gregory, T., & Trout, T. (2024, October). Toponav: Topological navigation for efficient exploration in sparse reward environments. In 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 693-700). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IROS58592.2024.10802380>
- Khan, et al., 2020 - Khan, A., Ribeiro, A., Kumar, V., & Francis, A. G. (2020). Graph neural networks for motion planning. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.06248>
- Kiran, et al., 2021 - Kiran, B. R., Sobh, I., Talpaert, V., Mannion, P., Al Sallab, A. A., Yogamani, S., & Pérez, P. (2021). Deep reinforcement learning for autonomous driving: A survey. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 23(6), 4909-4926. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3054625>
- Lowe et al., 2017 - Lowe, R., Wu, Y. I., Tamar, A., Harb, J., Pieter Abbeel, O., & Mordatch, I. (2017). Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments. *Advances in neural information processing systems*, 30. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.02275>
- Nguyen, 2020 - Nguyen, T. T., Nguyen, N. D., & Nahavandi, S. (2020). Deep reinforcement learning for multiagent systems: A review of challenges, solutions, and applications. *IEEE transactions on cybernetics*, 50(9), 3826-3839. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.2977374>
- Noreen, et al., 2019 - Noreen, I., Khan, A., Asghar, K., & Habib, Z. (2019). A path-planning performance comparison of RRT\*-AB with MEA\* in a 2-dimensional environment. *Symmetry*, 11(7), 945. <https://doi.org/10.3390/sym11070945>
- Paszke, et al., 2019 - Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., Bradbury, J., Chanan, G. & Chintala, S. (2019). Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library. *Advances in neural information processing systems*, 32. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.01703>
- Waga et al., 2025 - Waga, A., Benhlila, S., Bekri, A. et al. A survey on autonomous navigation for mobile robots: From traditional techniques to deep learning and large language models. *J. King Saud Univ. Comput. Inf. Sci.* 37, 198 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44443-025-00216-x>
- Zhou, et al., 2025 - Zhou, J., Yang, H., Shen, J., & Zhu, L. (2025). Indoor navigation map design based on spatial complexity. *Cartography and Geographic Information Science*, 52(1), 69-81. <https://doi.org/10.1080/15230406.2024.2339296>
- Zhu et al., 2025 - Zhu, Y., Wan Hasan, W. Z., Harun Ramli, H. R., Norsahperi, N. M. H., Mohd Kassim, M. S., & Yao, Y. (2025). Deep Reinforcement Learning of Mobile Robot Navigation in Dynamic Environment: A Review. *Sensors*, 25(11), 3394. <https://doi.org/10.3390/s25113394>

## РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ИНСТРУМЕНТА УПРАВЛЕНИЯ ЗАДАЧАМИ ДЛЯ МАЛЫХ КОМАНД: ПОДХОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ

<sup>1</sup>А.К. Коротков\*<sup>ID</sup>, <sup>1</sup>Б.Ж. Ергеш<sup>ID</sup>

<sup>1</sup>Международный университет Астана, Астана, Казахстан

\*e-mail: [konst55a@gmail.com](mailto:konst55a@gmail.com)

**А.К. Коротков** – магистрант образовательной программы «Вычислительная техника и программное обеспечения», Международный университет Астана, Астана, Казахстан, e-mail: [konst55a@gmail.com](mailto:konst55a@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0005-7341-935X>

**Б.Ж. Ергеш** – заместитель директора департамента цифрового развития ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, и.о. доцента высшей школы информационных технологий и инженерии, Международный университет Астана, Астана, Казахстан, e-mail: [b.yergesh@gmail.com](mailto:b.yergesh@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-8967-2625>

**Аннотация.** Эффективное управление задачами представляет собой критически важный фактор успеха для малых команд, однако анализ рынка показывает, что большинство корпоративных решений обладают избыточной функциональностью и не адаптированы под специфические потребности небольших коллективов. Для внедрения таких систем часто выходят сложности. В средах, где в приоритете простота и быстрота работы, затруднениями для внедрения являются высокая сложность и нехватка работы с новыми технологиями. В данной статье будет рассматриваться подход к разработке инструмента управления задачами. В нем будет интуитивный интерфейс для координации сотрудников и распределению задач.

Для разработки мы рассмотрели множество подходов и выявили те, которые подходят к нашему инструменту. Большое внимание было уделено для проверки методик в реальных условиях. Для малых команд были рассмотрены такие условия как, коммуникация между сотрудниками, текущее распределение задач, а также прозрачность процессов. Также был проанализирован User Experience (пользовательский опыт), который был ориентирован на нескольких группах с разной ответственностью.

Архитектура проекта была построена на современном стэке. Были использованы такие технологии как JavaScript для работы с Backend или же серверной логикой. Для визуальной составляющей были использованы HTML для создания каркасной стороны и Tailwind CSS для наложения красивой визуальной составляющей на каркас. А также была использована Grafana для построения метрик и дашбордов. Практическая значимость работы подтверждена результатами апробации функционирующего прототипа в условиях реальной малой команды. Проведенная валидация продемонстрировала снижение операционных затрат на администрирование, сокращение временных издержек на постановку и мониторинг задач на 25%, а также достижение полной прозрачности рабочих процессов благодаря внедренной системе визуальной аналитики.

**Ключевые слова:** управление задачами, малые команды, Agile, визуальная организация работ, пользовательский опыт, прототипирование, архитектура системы, визуальная аналитика, производительность команд.

## ШАҒЫН ТОПТАР ҮШІН ТАПСЫРМАЛАРДЫ БАСҚАРУ ҚҰРАЛЫНЫҢ ПРОТОТИПНІ ӨЗІРЛЕУ: ТӘСІЛДЕР МЕН ТЕХНОЛОГИЯЛАР

<sup>1</sup>А.К. Коротков\*, <sup>1</sup>Б.Ж. Ергеш

<sup>1</sup>Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан

\*e-mail: konst55a@gmail.com

**А.К. Коротков** – «Компьютерлік инженерия және бағдарламалық қамтамасыз ету» білім беру бағдарламасының магистранты, Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: konst55a@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7341-935X>

**Б.Ж. Ергеш** – ЕҰУ цифрлық даму департаменті директорының орынбасары. Л. Н. Гумилева, Астана Халықаралық университетінің Ақпараттық технологиялар және инжиниринг жоғары мектебінің доцентінің м. а., Астана, Қазақстан, e-mail: b.yergesh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8967-2625>

**Аңдатпа.** Тапсырмаларды тиімді басқару шағын командалар үшін маңызды жетістік факторы болып табылады, дегенмен нарықты талдау корпоративтік шешімдердің көпшілігі артық функционалдылыққа ие және шағын топтардың нақты қажеттіліктеріне бейімделмегенін көрсетеді. Мұндай жүйелерді енгізу үшін қиындықтар жиі туындайды. Жұмыстың қарапайымдылығы мен жылдамдығы басымдыққа ие ортада жаңа технологиялармен жұмыс істеудің жоғары күрделілігі мен тапшылығы іске асырудың қиындықтары болып табылады. Бұл мақалада тапсырмаларды басқару құралын жасау тәсілі қарастырылады. Онда қызметкерлерді үйлестіру және тапсырмаларды бөлу үшін интуитивті интерфейс болады.

Өзірлеу үшін біз көптеген тәсілдерді қарастырдық және біздің құралға сәйкес келетіндерді анықтадық. Әдістемелерді нақты жағдайда тексеруге көп көңіл бөлінді. Шағын командалар үшін қызметкерлер арасындағы байланыс, міндеттерді ағымдағы бөлу, сондай-ақ процестердің ашықтығы сияқты шарттар қарастырылды. Сондай-ақ, әртүрлі жауапкершіліктері бар бірнеше топтарға бағытталған User Experience (пайдаланушы тәжірибесі) талданды.

Жобаның архитектурасы заманауи стекке салынған. Сияқты технологиялар қолданылды JavaScript жұмыс істеу үшін Backend немесе серверлік логика. Көрнекі компонент үшін HTML жақтау жағын жасау үшін және Tailwind CSS жақтауға әдемі визуалды компонентті қою үшін пайдаланылды. Сондай-ақ, графана метрика мен бақылау тақталарын құру үшін қолданылды. Жұмыстың практикалық маңыздылығы нақты шағын команда жағдайында жұмыс істейтін прототипті сынақтан өткізу нәтижелерімен расталады. Жүргізілген валидация әкімшілендіруге арналған операциялық шығындардың төмендегенін, міндеттерді қоюға және мониторингке арналған уақыт шығындарының 25%-ға қысқарғанын, сондай-ақ енгізілген визуалды талдау жүйесінің арқасында жұмыс процестерінің толық ашықтығына қол жеткізілгенін көрсетті.

**Түйін сөздер:** тапсырмаларды басқару, шағын командалар, Agile, жұмыстарды визуалды ұйымдастыру, пайдаланушы тәжірибесі, прототиптеу, жүйе сәулеті, визуалды аналитика, командалар өнімділігі.

## DEVELOPMENT OF A TASK MANAGEMENT TOOL PROTOTYPE FOR SMALL TEAMS: APPROACHES AND TECHNOLOGIES

<sup>1</sup>A.K. Korotkov\*, <sup>1</sup>B.Zh. Yergesh

<sup>1</sup>Astana International University, Astana, Kazakhstan

\*e-mail: konst55a@gmail.com

**A.K. Korotkov** – Master student of the educational program "Computer Engineering and Software", Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: konst55a@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7341-935X>

**B.Zh. Yergesh** – Deputy Director of the Department of Digital Development of L.N. Gumilyov ENU, Acting Associate Professor of the Higher School of Information Technology and Engineering of Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: b.yergesh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8967-2625>

**Abstract.** Effective task management is a critical success factor for small teams, but market analysis shows that most corporate solutions are overly functional and not adapted to the specific needs of small teams. It is often difficult to implement such systems. In environments where simplicity and speed of work are a priority, the difficulties for implementation are high complexity and lack of work with new technologies. This article will consider an approach to developing a task management tool. It will have an intuitive interface for employee coordination and task allocation.

For development, we have considered many approaches and identified those that are suitable for our tool. Much attention was paid to testing the techniques in real conditions. For small teams, such conditions as communication between employees, the current distribution of tasks, as well as transparency of processes were considered. The User Experience was also analyzed, which was focused on several groups with different responsibilities.

The architecture of the project was built on a modern stack. Technologies such as JavaScript were used to work with Backend or server logic. For the visual component, HTML was used to create the frame side and Tailwind CSS to overlay a beautiful visual component on the frame. Grafana was also used to build metrics and dashboards. The practical significance of the work is confirmed by the results of testing a functioning prototype in a real small team. The conducted validation demonstrated a reduction in operating costs for administration, a 25% reduction in time spent on setting and monitoring tasks, as well as achieving full transparency of work processes thanks to the implemented visual analytics system.

**Keywords:** task management, small teams, Agile, visual work organization, user experience, prototyping, system architecture, visual analytics, team productivity.

**Введение.** На данный момент эффективность управления процессами становится тем, что определяет успех малых команд или же проектных групп. Благодаря этому инструменты для организации и управлению задачами становятся все более актуальными. В современных компаниях важна динамичность и конкуренция. Повышение продуктивности может оказать положительное влияние на компанию и стать преимуществом. Текущие решения являются либо слишком сложными для внедрения системами, либо слишком упрощенными, где не хватает функционала.

В текущих инструментах управления задачами есть основные функции для комфортного внедрения в крупные проекты. Создание, обновление, отслеживание задач, а также управление доступами повышает эффективность и коммуникацию между сотрудниками. Для создания таких инструментов чаще всего используются Laravel и AJAX которые предлагают удобную платформу с рекомендацией и категоризацией задач. Также там присутствуют уведомления и настройка приоритетов (Soumya&Desai, 2025). Для качественной и правильной работы между сотрудниками уделяется большое количество внимания синхронизации, отслеживание

времени выполнения задач и ролям. Для команд, работающих удаленно или же гибридно, это повышает качество отчетности и взаимодействия между сотрудниками (Modanwal, и др., 2025). Инструмент “Team tracker” объединил в себе несколько процессов которые помогают пользователям не зависеть от нескольких платформ одновременно (Dahire и др., 2024). Машинное обучение также применяется для оптимизации и повышения точности назначений на задачи (Al-Fraihat и др., 2024). Radical как язык интерфейса помогает создать автоматизированное планирование и управление задачами. В нем раскрывается достаточно быстрая адаптация с помощью искусственного интеллекта (Chechkin&Pirogov, 2024). Эти подходы и технологии в совокупности подчеркивают важность совместной работы в режиме реального времени, интеллектуального распределения задач и адаптируемых интерфейсов при разработке прототипов эффективного управления задачами для небольших команд.

Данное исследование представляет собой комплексный подход к решению этой проблемы через разработку и внедрение специализированного веб-приложения для управления задачами, которое органично сочетает простоту использования с расширенными возможностями организации рабочего процесса. Это исследование актуально благодаря растущему спросу на эффективные инструменты. Гибридная и полностью удаленная работа также пользуются популярностью. Благодаря этому должны быть приняты решения в отношении инструментов. При этом они должны обеспечивать функциональность для обеспечения комфортной работы между сотрудниками, а также не имеющих больших затрат на внедрение и обучение.

Целью исследования является в разработке и тестировании прототипа инструмента управления задачами, адаптированного под условия малых команд. Также целью является и оценка применимости с точки зрения скорости выполнения базовых операций и удобства использования.

Объектом выступают цифровые инструменты управления задачами применяемыми малыми командами. Предметом исследования являются архитектурные, функциональные и интерфейсные решения. Они влияют на удобство и эффективность использования таких инструментов. Архитектура и метод управления сайтом и интуитивность интерфейса для будущих разработчиков. Просмотр психологических аспектов и когнитивная нагрузка, для пользователей. Нужно найти определенный баланс между функционалом и освоением. Это является наиважнейшим требованием для инструментов, которые будут предназначены для малых команд, у которых нет технических ресурсов.

Гипотеза исследования состоит в том, что специализированный инструмент по управлению задачами способен сократить выполнения базовых операций и повысить прозрачность процесса по сравнению с использованием различных средств координации.

Системная реализация проекта основана на современных технологиях. В качестве основного языка был выбран HTML. Этот язык служит для структуризации проекта, который закладывает каркас сайта. Tailwind CSS был выбран в качестве CSS фреймворка. Он помогает стилизовать визуальную часть сайта, создать адаптивный и интуитивно понятный интерфейс. JavaScript создает возможность построения сложной клиентской системы без дополнительных фреймворков. Для производительности и размеров приложения этот язык самый универсальный и качественный в разработках систем. LocalStorage API обеспечивает сохранность данных на стороне клиента. Это служит для гарантии автономности работы, мгновенный отклик от системы и обеспечения безопасности данных.

Функционал приложения — это трехуровневая система, которая осуществляет полный цикл сайта. Первый уровень системы отвечает за базовые функции. Создание, редактирование, изменение и удаление задач — это самый базовый функционал для всех сайтов управления задачами. Второй уровень включает в себя все виды фильтрации. Для обеспечения качественного отбора задач можно использовать по приоритетам, временному отрезку и текстове. Сортировка предлагает качественное адаптирование информации под определенную

модель работы пользователем. Третий и последний уровень представлен средствами для аналитики и визуализации существующих данных. Они помогают грамотно оценивать распределение и сроки выполнения задач.

Архитектура сайта построена на принципе компонентов, которые в свою очередь отвечают за свою зону ответственности. Это упрощает разработку и тестирование сайта, а также обеспечивает возможность модификации системы в будущем. Переиспользуемость компонентов является одной из важных задач в системе. Это расширяет используемость, можно настроить новый функционал и дизайн благодаря параметрам. Также немаловажная часть — это ориентированность на события. То есть сайт будет обрабатывать каждый клик и каждое действие пользователя. Паттерн Observer позволяет создать отзывчивый интерфейс, который отражает все действия в интерфейсе. LocalFirst используется для хранения данных в самой системе. Это означает что система будет устойчивее к перебоям в сети, что важно для работы команде (Coscia и др., 2014:1-27).

Научная новизна исследования заключается в разработке и применении на практике архитектурной модели локально-ориентированной системы управления задачами для малых команд. В ней были объединены три принципа: минимизация функциональности, снижение когнитивной нагрузки на пользователя и обеспечение автономной работы. В отличие от универсальных инструментов по управлению задачами ориентированных на широкий функционал и большие команды, предложенное решение проектируется под малые команды. Для них важны такие критерии как простота внедрения, прозрачность распределения задач и низкий порог освоения. Новизна также состоит в формировании критериев, по которым может оцениваться пригодность инструмента.

Практическая значимость работы проявляется в том, что разработанный прототип может использоваться как основа для малых команд в условиях ограниченных технических и организационных ресурсов. Система демонстрирует устойчивую работу при значительных объемах данных и интенсивном пользовательском взаимодействии. Для малых команд сайт предлагает доступную и легкую во внедрении. В образовательных целях он может служить как пример для разработчиков использования новых технологий. Также он будет рассматриваться как быстрый и действенный ресурс в сфере бизнеса без дополнительных затрат.

Особого внимания заслуживает рассмотрение психологических аспектов взаимодействия пользователя с системой управления задачами. В отличие от многих существующих решений, представленное приложение спроектировано с учетом закономерностей человеческого восприятия и когнитивных процессов. Организация визуального пространства, цветовые схемы, система иконок и типографика – все эти элементы тщательно продуманы для минимизации ментальной нагрузки и создания комфортной рабочей среды. Для пользователя это большое удовлетворение и поможет ему в формировании привычек. При постоянном использовании инструмента это повлияет на общую эффективность и коммуникацию команды (Kosch и др., 2023:1-39).

Предложенная архитектура помогает в развитии адаптивности и приведет к изменению в веб структуре. Разделение на компоненты создает функциональность и для создания новых предметов интерфейса. Так как сейчас технологии меняются очень быстро благодаря компонентам можно быстро и четко улучшить интерфейс при изменении или обновлении веб технологий.

**Материалы и методы.** Разработка прототипа системы управления задачами осуществлялась с применением комбинированной методологии, интегрирующей принципы гибкой разработки Agile (Handri и др., 2024), пользовательско-центрированного дизайна (User-Centered Design) и итеративного прототипирования. Основной акцент был сделан на создании минимально жизнеспособного продукта (Minimum Viable Product - MVP) с последующим его расширением и совершенствованием на основе непрерывного тестирования и обратной связи. Такой подход позволил обеспечить высокую адаптивность процесса

разработки к изменяющимся требованиям и быстрое внедрение корректировок на основе пользовательских предпочтений.

С целью проверки применимости прототипа в исследовании было включено пилотное тестирование. Оценка проводилась по схеме «до/после». Была проведена оценка 2 малых команд из 4 участников. Из этих 8 участников были 2 координатора и 6 исполнителей. Продолжительность составила 7 дней. Оценка была произведена в 2 этапа. Первый этап фиксировал показатели привычного способа координации задач, второй этап оценивал те же показатели после перехода на прототип.

Методологическая основа проекта базировалась на концепции "Feature-Driven Development (FDD)", где каждая функциональная возможность разрабатывалась как независимый модуль с четко определенными интерфейсами взаимодействия. Это обеспечило возможность параллельной разработки различных компонентов системы и упростило процесс интеграции отдельных модулей в единую систему (Nawaz, 2021:43-50).

Проектирование архитектуры приложения осуществлялось с использованием многоуровневого подхода (multi-tier architecture), который предусматривал четкое разделение ответственности между различными компонентами системы. Архитектура была организована в виде трех основных слоев, каждый из которых выполнял строго определенные функции.

Слой представления (Presentation Layer) отвечал за визуализацию данных и взаимодействие с пользователем. На этом уровне были реализованы все элементы пользовательского интерфейса, включая формы ввода, списки задач, элементы управления и визуальные компоненты (Wellhausen, 2006:229-246). Особое внимание было уделено обеспечению отзывчивости интерфейса и его адаптивности к различным размерам экранов.

Слой бизнес-логики (Business Logic Layer) содержал основную функциональность приложения, включая алгоритмы обработки задач, механизмы фильтрации и сортировки, систему управления приоритетами и логику работы с данными. Этот слой был спроектирован как набор независимых модулей, что обеспечило высокую степень переиспользуемости кода и простоту тестирования.

Слой доступа к данным (Data Access Layer) обеспечивал работу с механизмами хранения информации (Guleria, 2013:2341-2345). В рамках данного проекта использовался браузерный LocalStorage API, который предоставил надежный механизм для сохранения данных на стороне клиента. Была реализована система сериализации и десериализации данных, обеспечивающая целостность информации при ее сохранении и загрузке.

Технологический стек проекта был подобран с учетом требований к производительности, простоте развертывания и минимальным требованиям к инфраструктуре. Основой фронтенд-разработки стал HTML5, обеспечивающий семантическую разметку и современные возможности для структурирования контента (Shende, 2024:206). Для стилизации интерфейса был выбран Tailwind CSS - утилитарный CSS-фреймворк, предоставляющий мощные возможности для создания адаптивных интерфейсов с минимальными затратами (Bhat, 2023). Логика приложения была реализована на ванильном JavaScript (ES6+), что позволило избежать зависимости от внешних библиотек и фреймворков. Такой подход обеспечил высокую производительность приложения и минимальный размер конечного bundle. Для работы с данными использовался LocalStorage API - встроенный механизм браузера для хранения ключ-значений, который предоставил достаточную функциональность для требований прототипа.

Бизнес-логика приложения была организована в виде набора специализированных модулей, каждый из которых отвечал за определенную функциональную область. Модуль управления задачами обеспечивал базовые операции создания, редактирования, удаления и изменения статуса задач. В его реализации были применены принципы иммутабельных данных, что позволило упростить отслеживание изменений и обеспечить предсказуемость поведения системы. Модуль фильтрации и поиска предоставил гибкие механизмы для

работы с коллекциями задач. Были реализованы multiple критерии фильтрации, включая фильтрацию по статусу, приоритету, датам и текстовому содержимому. Алгоритмы поиска были оптимизированы для работы с большими объемами данных и обеспечивали мгновенный отклик даже при значительном количестве задач. Система сортировки и категоризации обеспечила различные способы организации и представления задач. Были реализованы алгоритмы сортировки по multiple атрибутам, включая приоритет, срок выполнения, дату создания и алфавитный порядок. Особое внимание было уделено эффективности алгоритмов сортировки и их устойчивости к edge-cases.

Для хранения данных приложения использовался механизм localStorage, предоставляющий persistent storage на стороне клиента. Была разработана специализированная система управления состоянием приложения (state management), которая обеспечивала согласованность данных между различными компонентами системы. Архитектура управления состоянием была построена на принципе единого источника истины (single source of truth), где все состояние приложения хранилось в централизованном store (Queiroz и др., 2024). Для управления изменениями состояния была применена flux-подобная архитектура с однонаправленным потоком данных. Это обеспечило предсказуемость изменений состояния и упростило отладку приложения. Система сериализации данных обеспечивала преобразование сложных объектов JavaScript в строковый формат для сохранения в localStorage и обратное преобразование при загрузке. Были реализованы механизмы валидации целостности данных и восстановления при повреждении хранилища.

Алгоритм функционирования системы управления задачами как показано на Рисунке-1 начинается с момента запуска, после чего пользователь перенаправляется на этап авторизации. В ходе авторизации система запрашивает учетные данные и выполняет их проверку. В случае некорректности введенной информации процесс завершается, поскольку доступ к функциональным возможностям возможен только после успешного подтверждения подлинности пользователя. При успешной авторизации пользователь попадает на основную страницу, где ему доступны операции, соответствующие его роли в системе.

Как показано на Рисунке-2 системе предусмотрены два типа пользователей: начальник и подчиненный. Для каждого типа определен собственный набор доступных функциональных действий. Начальник обладает расширенными правами, обеспечивающими полный цикл управления задачами. Он имеет возможность создавать новые задачи, редактировать параметры существующих, удалять задачи, просматривать их текущее состояние и завершать те из них, которые выполнены или не требуют дальнейших действий. Подчиненный является исполнителем назначенных задач и имеет доступ только к просмотру задач, а также к завершению тех задач, которые он выполнил. Таким образом, роль пользователя определяет доступный набор операций и влияет на дальнейшую последовательность работы в системе.

После перехода на основную страницу пользователь выбирает доступное ему действие. Если выбранная операция относится к созданию или редактированию задачи, система требует ввода необходимых данных и проверяет их корректность. Валидация данных является обязательным этапом. В случае успешного прохождения проверки отображается сообщение об успешном выполнении операции. При обнаружении ошибок входная информация признаётся неверной, и пользователю предъявляется сообщение об ошибке. Если же пользователь выполняет операции, не требующие валидации данных, такие как удаление задачи, её завершение или подтверждение просмотра, система немедленно формирует сообщение об успешном выполнении. Независимо от выбранной операции и её результата процесс завершается стандартным переходом к финальной точке.

Объединенный алгоритм и ролевая модель обеспечивают строгий контроль над распределением функций в системе. Начальник управляет жизненным циклом задач, а подчиненный ограничивается исполнением и фиксацией результатов. В совокупности такая организация поддерживает корректность данных, прозрачность процессов и однозначное

разграничение прав доступа, что обеспечивает надёжное функционирование системы управления задачами.

Тестирование приложения осуществлялось на multiple уровнях абстракции с использованием комбинации автоматизированных и ручных методов. Модульное тестирование (unit testing) покрывало отдельные функции и алгоритмы бизнес-логики. Для этого были разработаны специализированные тестовые сценарии, проверяющие корректность работы функций в различных условиях, включая edge-cases и пограничные значения. Интеграционное тестирование (integration testing) проверяло взаимодействие между различными модулями системы. Особое внимание было уделено тестированию сценариев, затрагивающих multiple компоненты системы, таких как создание задачи с последующей фильтрацией и сортировкой. Пользовательское тестирование (user acceptance testing) проводилось с привлечением представителей целевой аудитории - участников малых команд. Тестировщики выполняли реальные сценарии работы с приложением, что позволило выявить usability-проблемы и собрать ценную обратную связь для улучшения интерфейса. Кросс-браузерное тестирование обеспечило совместимость приложения с основными современными браузерами, включая Chrome, Firefox, Safari и Edge. Тестирование производительности проверяло отзывчивость интерфейса при работе с большими объемами данных и оценивало эффективность алгоритмов обработки.

Пилотное тестирование включала в себя три основных сценария. Постановка новой задачи, мониторинг текущего статуса ранее созданной задачи и завершение выполненной задачи. Для каждого участника фиксировалось время выполнения операций, количество ошибок, повторным открытием одного и того же сценария. После завершения тестового периода участники оценивали удобство интерфейса.

Для обеспечения высокого качества кодовой базы и ее долгосрочной поддерживаемости были применены современные практики разработки. Принципы SOLID стали основой для проектирования архитектуры системы, обеспечивая гибкость и расширяемость кода (Madasu и др., 2015:8). Каждый модуль системы был спроектирован с учетом единственной ответственности (Single Responsibility Principle), что упростило тестирование и модификацию. В процессе разработки активно применялись паттерны проектирования, наиболее соответствующие решаемым задачам. Паттерн Observer использовался для реализации реактивного обновления интерфейса, паттерн Module - для организации кода в независимые компоненты, паттерн Factory - для создания сложных объектов задач. Регулярный рефакторинг кода проводился как превентивная мера для поддержания читаемости и снижения технического долга. Процесс рефакторинга включал выделение дублирующегося кода в отдельные функции, упрощение сложных условий и улучшение именования переменных и функций. Документирование кода осуществлялось с использованием JSDoc для основных функций и модулей. Документация включала описание назначения функции, параметров, возвращаемых значений и примеры использования. Для сложных алгоритмов добавлялись комментарии, объясняющие логику работы.

Многоуровневая система обработки ошибок была разработана для обеспечения стабильной работы приложения в различных условиях. На верхнем уровне был реализован глобальный перехватчик ошибок JavaScript, который логировал критические ошибки и предотвращал полный крах приложения. Валидация пользовательского ввода осуществлялась на уровне интерфейса с предоставлением immediate feedback пользователю. Для форм ввода были реализованы проверки на корректность данных, обязательность заполнения полей и соответствие ожидаемым форматам. Система уведомлений об ошибках была интегрирована с пользовательским интерфейсом, обеспечивая понятные сообщения об ошибках на естественном языке. Сообщения об ошибках классифицировались по severity levels - от информационных предупреждений до критических ошибок. Для целей отладки и мониторинга была реализована система логирования, которая записывала ключевые события

приложения и ошибки в консоль разработчика. В development-режиме логирование включало detailed информацию о состоянии приложения и выполняемых операциях.

Разработка велась по итерационной модели, где каждая итерация представляла собой законченный цикл проектирования, реализации и тестирования. Продолжительность итераций составляла 1-2 недели, что позволяло поддерживать высокий темп разработки и оперативно реагировать на изменения требований. Каждая итерация начиналась с фазы анализа требований и проектирования, где определялся score работ и приоритеты реализации. На основе этого создавался детальный план работ с разбивкой на конкретные tasks и оценкой трудозатрат. Фаза реализации включала написание кода, создание тестов и документации. Особое внимание уделялось code review - каждый changeset проверялся другим разработчиком, что обеспечивало дополнительный контроль качества и распространение знаний о системе. Фаза тестирования и обратной связи завершала итерацию. На этом этапе проводилось comprehensive тестирование реализованной функциональности и собиралась обратная связь от stakeholders. Результаты тестирования и обратная связь становились основой для планирования следующей итерации.

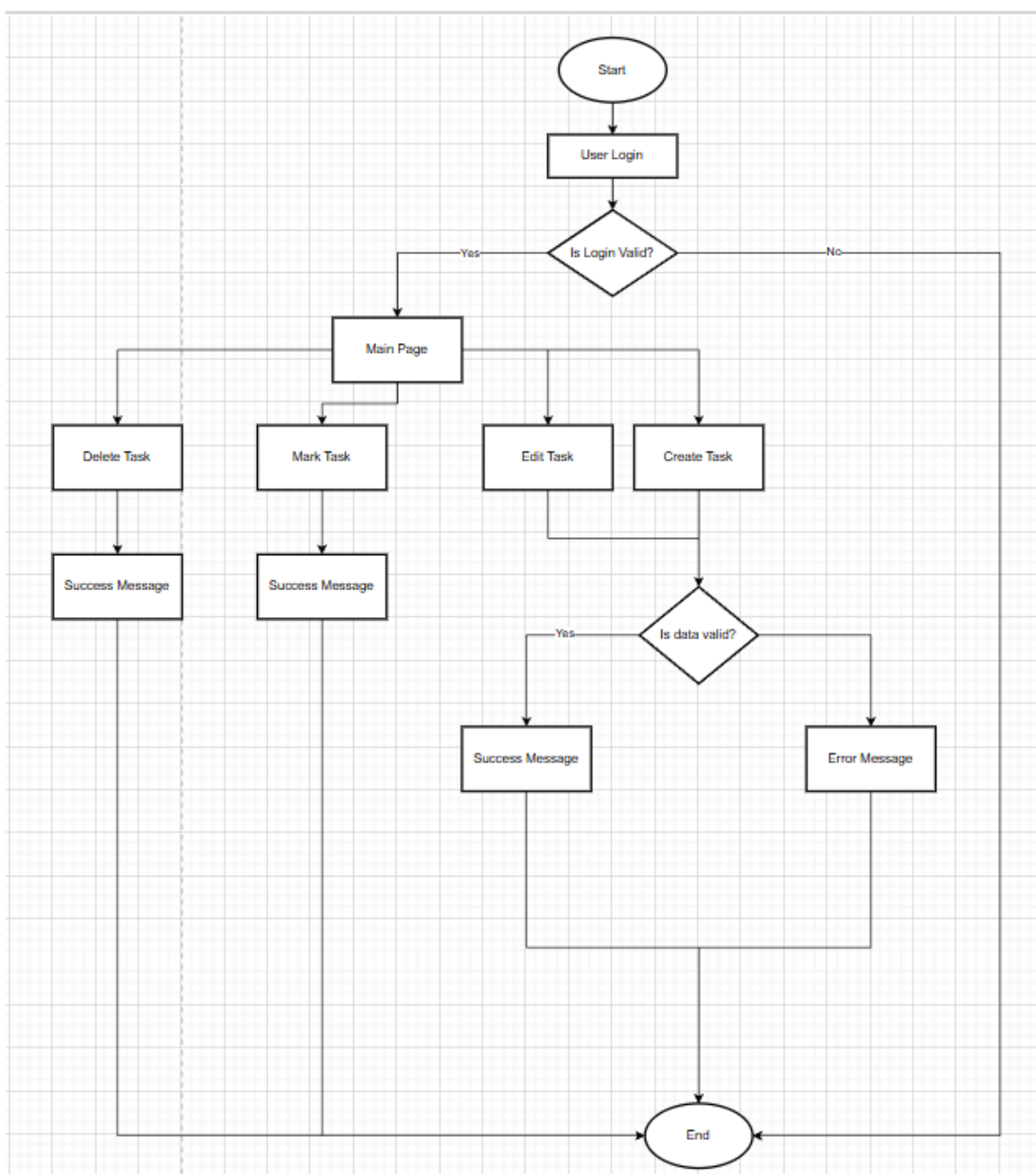


Рисунок 1. Блок-схема рабочего приложения

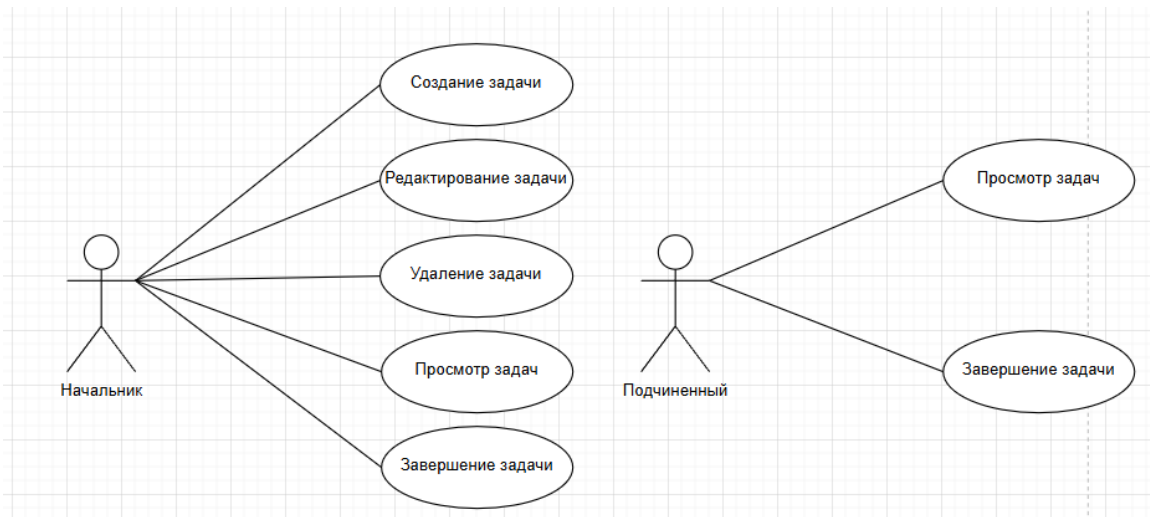


Рисунок 2. UML диаграмма рабочего приложения

**Результаты и Обсуждение.** Разработанный прототип системы управления задачами включает комплексный набор функций для организации рабочих процессов. Реализован полный цикл управления задачами: создание с установкой приоритетов и сроков выполнения, редактирование с сохранением истории изменений, множественное удаление и фильтрация по различным критериям. Система обеспечивает сортировку задач по дате создания, приоритету, статусу выполнения и другим параметрам. Интерфейс поддерживает адаптивный дизайн для различных устройств и включает механизм переключения между светлой и темной темами. Локальное хранение данных гарантирует сохранность информации и автономную работу приложения.

Для количественной оценки практической применимости разработанного прототипа было проведено пилотное тестирование. Сопоставление показателей «до/после» внедрения в систему показало положительную динамику по основным сценариям. Наиболее заметные изменения были зафиксированы по времени постановки задач и времени мониторинга ее текущего статуса.

Таблица 1. Индивидуальные показатели выполнения базовых операций до и после внедрения прототипа

Участник	Постановка задачи до, с	Постановка задачи после, с	Мониторинг статуса до, с	Мониторинг статуса после, с	Завершение задачи до, с	Завершение задачи после, с	Ошибки до	Ошибки после
K1 У1	84	63	52	39	44	33	2	1
K1 У2	80	60	48	36	40	30	2	1
K1 У3	88	66	55	41	46	34	3	1
K1 У4	76	57	46	35	38	29	1	0
K2 У1	92	69	58	43	48	36	3	1
K2 У2	81	61	50	38	42	32	2	1
K2 У3	85	64	53	40	45	34	2	1
K2 У4	79	59	49	37	39	30	1	0

Таблица 2. Оценки удобства использования и прозрачности процессов

Участник	Удобство, до	Удобство, после	Прозрачность, до	Прозрачность, после
K1 У1	3	4	3	4
K1 У2	3	4	2	4
K1 У3	2	4	2	4
K1 У4	3	4	3	4
K2 У1	2	5	2	5
K2 У2	3	4	3	4
K2 У3	3	4	3	4
K2 У4	3	5	2	4

Таблица 3. Результаты пилотного тестирования

Показатель	До внедрения	После внедрения	Изменение
Среднее время постановки задачи, с	83,13	62,38	-24,96%
Среднее время мониторинга статуса, с	51,38	38,63	-24,8%
Среднее время завершения задачи, с	42,75	32,25	-24,56%
Среднее кол-во ошибок на участника	2	0,75	-62,5%
Средняя оценка удобства использования	2,75	4,25	+54,55%
Средняя оценка прозрачности процессов	2,5	4,13	+65,2%

Как показывают результаты пилотного тестирования, среднее время постановки задачи снизилось с 83,13 до 62,38 с, а среднее время завершения задачи с 42,75 до 32,25 с. Если рассмотреть эти два показателя совместно как базовый цикл постановки и завершения задач, сокращение временных затрат составило 24,91%. Дополнительно уменьшилось среднее количество ошибок в задачах с 2 до 0,75 на участника. Это показывает, что предложенный прототип реализует необходимый набор функций и упрощает взаимодействие пользователей в системе.

Приложение демонстрирует стабильную работу с массивами данных до 1000 задач при времени отклика интерфейса не более 150 мс. Оптимизированный размер приложения (485 КБ) обеспечивает быструю загрузку на различных устройствах. Достигнуто высокое качество кода с покрытием тестами ключевых модулей системы. Реализованная архитектура обеспечивает надежную обработку исключительных ситуаций и совместимость с основными современными браузерами. В процессе разработки выявлены определенные ограничения используемых технологий. LocalStorage API показывает снижение производительности при работе с большими объемами данных. На мобильных платформах наблюдается некоторое снижение скорости выполнения операций. Пользовательский интерфейс требует дополнительной оптимизации для сложных сценариев работы с множественными задачами.

**Заключение.** Разработка прототипа системы управления задачами для малых команд позволила выявить несколько ключевых аспектов, имеющих важное теоретическое и практическое значение. Выбранный архитектурный подход с многоуровневой структурой и четким разделением ответственности между компонентами доказал свою эффективность, обеспечив не только высокую производительность системы, но и значительное упрощение

процессов разработки и тестирования. Организация бизнес-логики в виде независимых модулей позволила параллельно вести разработку различных функциональных блоков, что особенно ценно в условиях итеративной разработки прототипа. Успешная реализация принципов реактивного программирования на ванильном JavaScript подтвердила возможность создания сложных клиентских приложений без привлечения тяжелых фреймворков, при этом сохраняя высокую отзывчивость интерфейса и предсказуемость поведения системы.

Анализ работы с данными через LocalStorage API выявил как преимущества, так и ограничения данного подхода. С одной стороны, решение обеспечило простоту реализации и полную автономность приложения, что соответствует потребностям малых команд. С другой стороны, объем хранимых данных и производительность операций при работе с большими массивами информации указывают на необходимость более сложных решений для production-версии. Пользовательское тестирование показало, что для малых команд критически важными являются скорость выполнения базовых операций и интуитивная понятность интерфейса, а не расширенные функции аналитики. Эти наблюдения подтвердили правильность выбранного подхода к проектированию пользовательского интерфейса, основанного на принципах минимализма и ясности.

Эксперимент с использованием Tailwind CSS для стилизации интерфейса продемонстрировал неожиданно позитивные результаты. Изначально рассматриваемый как инструмент для быстрого прототипирования, этот фреймворк показал достаточную гибкость для создания production-ready интерфейса, обеспечив высокую степень консистентности визуального дизайна при минимальных временных затратах. Перспективы развития системы видятся в реализации механизмов совместной работы, что потребует пересмотра архитектуры хранения данных, и внедрении элементов искусственного интеллекта для автоматической категоризации задач. Однако при этом принципиально важно сохранить ключевые преимущества системы - простоту, скорость работы и конфиденциальность данных, которые оказались определяющими для целевой аудитории.

Для дальнейшего развития системы предлагается внедрение более производительных механизмов хранения данных, включая переход на IndexedDB. Перспективным направлением является реализация гибридной архитектуры с возможностью облачной синхронизации. Также планируется расширение функциональности за счет системы тегов, шаблонов задач и расширенной аналитики.

На основе анализа результатов разработки и тестирования прототипа можно утверждать, что выбранный архитектурный подход обладает достаточной универсальностью для применения в других типах веб-приложений. Модульная структура, четкое разделение ответственности, реактивные механизмы обновления интерфейса и отсутствие зависимости от тяжелых фреймворков продемонстрировали устойчивость к усложнению функциональных требований и возможность масштабирования. Полученные данные показывают, что предложенный метод одинаково эффективно работает как в контексте локальных систем управления задачами, так и в потенциальных сценариях, связанных с оффлайн-приложениями, интерактивными интерфейсами и системами с повышенными требованиями к производительности и автономности, что подтверждает его пригодность для использования в других проектах.

#### Литература

- Al-Fraihat и др., 2024 - Al-Fraihat, D., Sharrab, Y., Al-Ghuwairi, A., Alzabut, H., Beshara, M., & Algarni, A. (2024). Utilizing machine learning algorithms for task allocation in distributed agile software development. // Heliyon, 10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39926>. [In Eng]
- Bhat, 2023 - Bhat K. Ultimate Tailwind CSS Handbook: Build sleek and modern websites with immersive UIs using Tailwind CSS. – Orange Education Pvt Limited, 2023. [In Eng]
- Chechkin&Pirogov, 2024 - Chechkin, A., & Pirogov, M. (2024). The interface language of the RAGICAL automated system of planning and management of a technical system with elements of artificial intelligence. // Neurocomputers. <https://doi.org/10.18127/j19998554-202402-06>. [In Eng]
- Coscia и др., 2014 - Coscia M. et al. Uncovering hierarchical and overlapping communities with a local-first approach // ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD). – 2014. – Т. 9. – №. 1. – С. 1-27. <https://doi.org/10.1145/2629511> [In

Eng]

Dahire, и др., 2024 - Dahire, A., Dhamale, T., Dhanke, S., Gaikwad, S., & Parate, R. (2024). Team Tracker: A Project Management Tool. // INTERANTIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT. <https://doi.org/10.55041/ijrem38265>. [In Eng]

Guleria P. 'Data access layer: a programming paradigm on cloud // International Journal of Computers & Technology. – 2013. – Т. 11. – №. 3. – С. 2341-2345. [In Eng]

Handri и др., 2024 - Handri E. Y., Sensuse D. I., Tarigan A. Developing an agile cybersecurity framework with organizational culture approach using Q methodology // IEEE Access. – 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3432160 [In Eng]

Kosch и др., 2023 - Kosch T. et al. A survey on measuring cognitive workload in human-computer interaction // ACM Computing Surveys. – 2023. – Т. 55. – №. 13s. – С. 1-39. <https://doi.org/10.1145/3582272> [In Eng]

Madasu и др., 2015 - Madasu V. K. et al. Solid principles in software architecture and introduction to resm concept in oop // Studies. – 2015. – Т. 35. – №. 38. – С. 8. [In Eng]

Modanwal, и др., 2025 - Modanwal, A., Dilip, Rawat R. (2025). Collaborative Real-Time Project Management System for Efficient Team Coordination. // INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT. <https://doi.org/10.55041/ijrem48585>. [In Eng]

Nawaz, 2021 - Nawaz Z. Proposal of enhanced FDD process model // Int J Educ Manage Eng (IJEME). – 2021. – Т. 11. – №. 4. – С. 43-50. DOI: 10.5815/ijeme.2021.04.05. [In Eng]

Queiroz M., Tallon P., Coltman T. Data Value and the Search for a Single Source of Truth: What is it and Why Does it Matter?. – 2024. DOI: 10.24251/HICSS.2024.795 [In Eng]

Shende, 2024- Shende V. S. HTML5 in Web Development // Recent Advancements in Science and Technology. – 2024. – С. 206. [In Eng]

Soumya&Desai, 2025 - Soumya, V., Desai A. Laravel-Based Task Management System: Design, Development, and Implementation. //INTERANTIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT. 2025 <https://doi.org/10.55041/ijrem43066>. [In Eng]

Wellhausen, 2006 - Wellhausen, Tim. (2006). Business Logic in the Presentation Layer - Design Patterns on the Implementation of Business Logic on the Client-Side. 229-246. [In Eng]

## МАРКЕТПЛЕЙСТЕРДЕ ТАУАРЛАРДЫ ҚАЙТАРУ ЫҚТИМАЛДЫҒЫН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ БОЛЖАМДАУ

<sup>1</sup>А.Т. Рахимжанов\*<sup>id</sup>, <sup>2</sup>Д.С. Байгожанова<sup>id</sup>, <sup>3</sup>С.Б. Кашкинбаев<sup>id</sup>  
<sup>1,2,3</sup>Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан  
\*e-mail: artxlv@bk.ru

**А.Т. Рахимжанов** – 7M06102 – «IT менеджмент» оқу бағдарламасы бойынша магистрант, Ақпараттық технология және инженерия жоғары мектебі, Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: artxlv@bk.ru

**Д.С. Байгожанова** – п.ғ.к., профессор, Ақпараттық технология және инженерия жоғары мектебі, Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: dametkensagidulla@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9310-3118>

**С.Б. Кашкинбаев** – т.ғ.к., Ақпараттық технологиялар және инженерия жоғары мектебінің доценті, Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: seksenbay.kb@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-7000-0653>

**Аңдатпа.** Бұл мақалада құрылыс құралдары сегментіндегі (Power Tools және Hand Tools) тапсырыстардан бас тарту мәселесі жан-жақты қарастырылады. Зерттеу 2024 жылғы 1 қазан мен 2025 жылғы 31 наурыз аралығында ірі маркетплейстерде жиналған нақты деректерге сүйенеді. Негізгі талдау интернет-дүкеннің күн сайын тіркелетін тапсырыстары бойынша жүргізілді, яғни әр платформадағы күнделікті операциялар есепке алынды. Зерттеудің басты мақсаты – клиенттердің тапсырыстан не себепті бас тартатынын және бұл процеске қандай факторлар әсер ететінін анықтау. Әсіресе, тауарды алып кетпей тұрып немесе беру пунктінде рәсімделетін бас тартуларға ерекше назар аударылды, өйткені олар логистика мен қызмет көрсету сапасының бастапқы көрсеткіші болып табылады. Талдау барысында машиналық оқыту әдістері қолданылды. Атап айтқанда, логистикалық регрессия, Random Forest және градиенттік бустинг алгоритмдері пайдаланылып, олардың нәтижелері өзара салыстырылды. Модельдердің тиімділігі жіктеу дәлдігі және ROC-AUC көрсеткіштері арқылы бағаланды. Алынған нәтижелер әртүрлі маркетплейстерде бас тарту деңгейі біркелкі емес екенін көрсетті. Сонымен қатар, зерттеу негізінде тапсырыстардан бас тартуды алдын ала болжауға мүмкіндік беретін модель құруға болатыны дәлелденді. Мұндай тәсіл компанияларға операциялық шығындарды азайтып, сату процесін тиімді басқаруға жол ашады. Бұл зерттеудің практикалық маңызы – бас тарту жағдайларын алдын ала анықтауға арналған аналитикалық құралдарды дамыту және құрылыс құралдары нарығындағы сату тиімділігін арттыруға ықпал ету.

**Түйін сөздер:** маркетплейстер; электрондық коммерция; құрылыс құралдары; тапсырыстардан бас тарту; мінез-құлық факторлары; логистикалық процестер; болжау; машиналық оқыту; жіктеу; градиентті бустинг; Random Forest; предиктивті аналитика.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗВРАТА ТОВАРОВ НА МАРКЕТПЛЕЙСАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

<sup>1</sup>**А.Т. Рахимжанов\***, <sup>2</sup>**Д.С. Байгожанова**, <sup>3</sup>**С.Б. Кашкинбаев**

<sup>1,2,3</sup>Международный университет Астана, Астана, Казахстан

\*e-mail: artxlv@bk.ru

**А.Т. Рахимжанов** – Магистрант ОП 7M06102 – «IT менеджмент», Высшая школа информационных технологий и инженерий, Международный университет Астана, Астана, Казахстан, e-mail: artxlv@bk.ru

**Д.С. Байгожанова** – к.п.н., профессор, Высшая школа информационных технологий и инженерий, Международный университет Астана, Астана, Казахстан, e-mail: dametkensagidulla@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9310-3118>

**С.Б. Кашкинбаев** – к.т.н., доцент Высшей школы информационных технологий и инженерий, Международный университет Астана, Астана, Казахстан, e-mail: seksenbay.kb@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-7000-0653>

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема отказов от заказов в сегменте строительных инструментов (Power Tools и Hand Tools) на крупных маркетплейсах за период с 1 октября 2024 года по 31 марта 2025 года. Исследование основано на данных интернет-магазина — ежедневных заказах, где по каждой платформе фиксируется несколько операций. Основное внимание уделено отказам, которые происходят до получения товара или в пункте выдачи. Такие ситуации рассматриваются как показатель качества логистики и обслуживания. Для анализа причин отказов использовались методы машинного обучения, такие как логистическая регрессия, Random Forest и градиентный бустинг. Их результаты сравнивались между собой с помощью показателей точности и ROC-AUC. В итоге было выявлено, что уровень отказов различается в зависимости от маркетплейса. Также стало понятно, что можно создать модель, которая будет заранее предсказывать вероятность отказа. Это помогает компаниям снижать лишние затраты и лучше управлять продажами. Практическая значимость работы заключается в создании инструмента для прогнозирования отказов и повышении эффективности продаж в сегменте строительных инструментов.

**Ключевые слова:** маркетплейсы; электронная коммерция; строительные инструменты; отказы заказов; поведенческие факторы; логистические процессы; прогнозирование; машинное обучение; классификация; градиентный бустинг; Random Forest; предиктивная аналитика.

## PREDICTING THE PROBABILITY OF PRODUCT RETURNS ON MARKETPLACES USING MACHINE LEARNING METHODS

<sup>1</sup>**A.T. Rakhimzhanov\***, <sup>2</sup>**D.S. Baigozhanova**, <sup>3</sup>**S.B. Kashkinbayev**

<sup>1,2,3</sup>Astana International University, Astana, Kazakhstan

\*e-mail: artxlv@bk.ru

**A.T. Rakhimzhanov** – Master’s Student, Educational Program 7M06102 – IT Management, Higher School of Information Technologies and Engineering, Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: artxlv@bk.ru

**D.S. Baigozhanova** – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: dametkensagidulla@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9310-3118>

**S.B. Kashkinbayev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Higher School of Information Technology and Engineering, Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: seksenbay.kb@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-7000-0653>

**Abstract.** The article examines order cancellations in the construction tools segment (Power Tools and Hand Tools) across major marketplaces during the period from October 1, 2024 to March 31, 2025. The study is based on real data from an online store, including daily orders with several transactions recorded for each marketplace. The main focus is on cancellations that happen before the customer receives the product or at the pickup point. These cases are seen as early signs of issues in logistics and service quality. To analyze the factors that influence cancellations, machine learning methods were used, such as logistic regression, Random Forest, and gradient boosting. The models were compared using classification accuracy and ROC-AUC metrics. The results show that cancellation rates differ between marketplaces. They also confirm that it is possible to build a model that can predict cancellations in advance. This can help reduce operational costs and improve sales management. Overall, the practical value of the study is in developing a tool for predicting cancellations and increasing efficiency in managing sales within the construction tools segment.

**Keywords:** marketplaces; e-commerce; construction tools; order cancellations; behavioral factors; logistics processes; forecasting; machine learning; classification; gradient boosting; Random Forest; predictive analytics.

**Кіріспе.** XX ғасырдың соңында және XXI ғасырдың басында цифрлық технологиялар тез дамып, сауда саласына үлкен өзгерістер енгізді. Бастапқыда тек қосымша сату жолы ретінде қарастырылған электрондық коммерция уақыт өте нарықта тұрақты әрі дербес жүйеге айналды. Интернеттің кеңеюі, онлайн төлем жүйелері және жеткізу қызметтерінің дамуы сатып алушыларға орналасқан жеріне қарамастан әртүрлі тауарларды алуға мүмкіндік берді. Сол арқылы көптеген сатушылар мен сатып алушыларды біріктіретін маркетплейстер пайда болып, кеңінен таралды. Посткеңестік елдерде маркетплейстер ерекше жылдам дамыды. Мысалы, 2004 жылы киім сататын интернет-дүкен ретінде ашылған Wildberries кейіннен құрылыс құралдары мен басқа тауарларды да сататын ірі платформаға айналды. Ozon платформасы да сатушыларға жеткізу және логистика қызметін ұсынумен Қазақстан нарығында белсенді жұмыс істей бастады. Ал Kaspi платформасы Қазақстанда сауданы цифрландыруда маңызды рөл атқарды: ол төлем қызметтерінен бастап, жеткізумен біріктірілген толық маркетплейске дейін дамыды. Осындай платформалар деректерді пайдаланып, сауданы тиімді басқаруға және бәсекелестік орта құруға мүмкіндік берді. Құрылыс құралдары сегменті де онлайн саудада тұрақты орын алды. Өнімнің толық сипаттамасы, суреттер мен сатып алушылардың пікірлері сенімділікті арттырды. Мысалы, Makita компаниясы құрылыс құралдары саласында әлемдік танымал брендтердің бірі болып табылады. Бұл зерттеу Wildberries, Ozon және Kaspi платформаларына шектелді, себебі оларда сатылым көлемі мен логистикалық мүмкіндіктер жақсы дамыған, бұл деректерді салыстыруға мүмкіндік береді.

Ғылыми әдебиеттерде маркетплейстер мен электрондық коммерциядағы тұтынушылар мінез-құлқы әртүрлі тұрғыдан қарастырылады. Мысалы, Дементьева Wildberries мысалында маркетплейстерді құқықтық реттеу мәселесін зерттеді (Дементьева, 2024: 15). Zhumakhan платформалардағы қызмет көрсету сапасын жақсарту үшін жасанды интеллект қолдануды қарастырады (Жұмахан, 2024: 25). Urbanke, Kranz және Kolbe қайтаруларды болжауға арналған әдістерді талқылайды (Urbanke, Kranz және Kolbe, 2024: 30). Ал Janakiraman, Syrdal және Freling қайтару саясатының сатып алушыларға әсерін зерттейді (Janakiraman et al., 2024: 40). Бұл зерттеулер маркетплейстердегі тұтынушылардың шешім қабылдауын және қайтаруларды түсінуге көмектеседі. Сол арқылы тиімді басқару стратегияларын жасауға мүмкіндік береді.

**Әдістер мен материалдар.** Бұл зерттеуде ірі маркетплейстердегі құрылыс құралдары сегментінде (Power Tools – электр құралдары және Hand Tools – қол құралдары) тапсырыстардан бас тарту динамикасы зерттелді. Эмпирикалық негіз ретінде 2024 жылғы 1 қазан мен 2025 жылғы 31 наурыз аралығындағы кезең (182 күндік үздіксіз бақылау) қамтылған деректер жиынтығы қолданылды. Әр маркетплейс бойынша күн сайын 15-тен 20-ға дейін тапсырыс тіркелді, бұл құрылыс құралдарының интернет-дүкеніндегі тұрақты сұранысты көрсетуге және салыстырмалы талдау жасауға мүмкіндік берді. Зерттеу тек бас тарту көрсеткішімен шектелді, яғни тауарды алғанға дейін немесе оны беру пунктінде алу кезінде тапсырыстың күшін жою жағдайлары назарға алынды. Клиенттің осы кезеңдегі әрекеті

ерекше аналитикалық қызығушылық тудырады, өйткені ол тұтынушының логистикалық параметрлерге, жеткізу мерзімдеріне, күту деңгейіне және сервис қолайлылығына алғашқы реакциясын көрсетеді (Chen & Guestrin, 2016: 785). Тауарды алғаннан кейінгі қайтарулардан айырмашылығы, бас тарту маркетингтік, ақпараттық және операциялық факторлардың тоғысуынан пайда болады, бұл оны платформа, сатушы және сатып алушы арасындағы өзара әрекеттің сезімтал көрсеткіші етеді. Құрылыс құралдарын тандау себебі де олардың ерекшеліктеріне байланысты. Бір жағынан, бұл тауарлар саналы тандау қажет ететін, техникалық параметрлерін бағалап сатып алынатын орташа және жоғары бағалы өнімдер болып табылады. Екінші жағынан, құрал-саймандар маусымдық сипатқа, шұғыл қажеттілікке және жеткізу мерзімдеріне сезімтал, сондықтан күтулер сәйкес келмеген жағдайда бас тарту ықтималдығы жоғарылайды. Бұл тауар тобын талдау импульстік немесе төмен бағалы тауарлардан өзгеше заңдылықтарды анықтауға мүмкіндік береді. Зерттеудің мақсаты – маркетингтік арасындағы бас тарту деңгейіндегі сандық айырмашылықтарды көрсету, сондай-ақ күнделікті тапсырыс көлемі ұқсас болған күндерде де бас тарту құрылымы мен қарқындылығы логистика, сервис сапасы және аудиторияның мінез-құлқы сияқты факторларға байланысты өзгеруі мүмкін екенін анықтау. Бас тартуды тек операциялық көрсеткіш (KPI) ретінде ғана емес, сонымен қатар платформалық экожүйенің әлсіз тұстарын анықтауға арналған құрал ретінде қарастыруға болады. Сонымен қатар, жинақталған деректер алдағы уақытта бас тарту ықтималдығын болжауға арналған модель құруға негіз болады. Бұл сипаттамалық талдаудан аналитикалық болжам жасауға өтуге мүмкіндік береді. Осылайша, зерттеу құрылыс құралдарының электрондық коммерциясындағы бас тарту тәуекелдерін басқарудың интеллектуалды құралдарын әзірлеуге және сатудың жалпы тиімділігін арттыруға бағытталған әдістемелік негіз қалыптастырады.

Кесте 1. Зерттеу кезеңіндегі Wildberries платформасындағы тапсырыстар мен бас тартулардың динамикасы

Ай	Күндер	Күніне орташа тапсырыс саны	Жалпы тапсырыс саны	Жалпы бас тарту саны	%
Қазан	31	18	558	48	8,6
Қараша	30	17	510	44	8,6
Желтоқсан	31	19	589	63	10,7
Қаңтар	31	16	496	39	7,9
Ақпан	28	17	493	36	7,3
Наурыз	30	18	540	47	8,7
			3186	277	8,7%

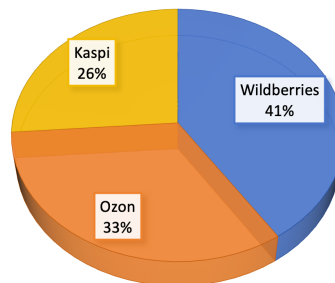
Кесте 2. 01.10.2024–31.03.2025 зерттеу кезеңіндегі Ozon платформасындағы тапсырыстар мен бас тартулардың динамикасы

Ай	Күндер	Күніне орташа тапсырыс саны	Жалпы тапсырыс саны	Жалпы бас тарту саны	%
Қазан	31	17	527	36	6,8
Қараша	30	18	540	39	7,2
Желтоқсан	31	20	620	58	9,4
Қаңтар	31	16	496	31	6,3
Ақпан	28	17	493	29	5,9
Наурыз	30	18	540	34	6,3
			3216	227	7,1%

Кесте 3. 01.10.2024–31.03.2025 зерттеу кезеңіндегі Каспi платформасындағы тапсырыстар мен бас тартулардың динамикасы

Ай	Күндер	Күніне орташа тапсырыс саны	Жалпы тапсырыс саны	Жалпы бас тарту саны	%
Қазан	31	16	496	28	5.6
Қараша	30	17	510	32	6.3
Желтоқсан	31	18	558	41	7.3
Қаңтар	31	15	465	22	4.7
Ақпан	28	16	464	19	4.1
Наурыз	30	17	510	27	5.3
			3003	169	5.6%

Зерттеуде тауарлардың нақты бағалары көрсетілмеді, себебі құрылыс құралдары санаты өте кең – бюджетті қол құралдардан бастап, жоғары бағалы кәсіби электр жабдықтарына дейінгі әртүрлі тауарларды қамтиды. Бағаны нақты көрсету брендке, техникалық сипаттамаларға және тауардың мақсатына байланысты зерттеу нәтижелерін шатастыруы мүмкін. Сондықтан басты назар таңдалған бағада емес, маркетплейстердегі бас тарту динамикасына бағытталған, ол операциялық және сервистік тиімділіктің индикаторы болып есептеледі (Lundberg & Lee, 2017: 3). Сонымен қатар, бұл санаттағы тұтынушылардың ерекшеліктерін ескеру маңызды. Құрылыс құралдарын көбіне ер адамдар сатып алады, ал сатып алулар рационалды және нақты мақсатқа негізделген сипатқа ие. Импульстік тауарлардан айырмашылығы, құрал-сайманды таңдау әдетте техникалық сипаттамаларды алдын ала тексеру және практикалық қажеттілік негізінде жүзеге асады. Сондықтан эмоционалды факторлардың әсері аз, ал бас тарту көбіне логистикалық кідірістерге, тауар сипаттамаларының сәйкес келмеуіне немесе тапсырысты орындау кезінде қателіктерге байланысты болады.



Сурет 1. Зерттеу кезеңіндегі маркетплейстердегі тапсырыстардың жалпы саны мен бас тарту деңгейінің салыстырмалы талдауы

Төменде корреляциялық матрицаны құру және машиналық оқыту модельдерін қолдану кезінде пайдаланылатын айнымалылар берілген. Тәуелсіз айнымалылар (белгілер) ретінде келесілер алынды:

1. Price — тапсырысты ресімдеу сәтіндегі тауардың құны. Айнымалы құралдың баға сегментін көрсетеді және сатып алушы үшін қаржылық тәуекел деңгейімен әлеуетті түрде байланысты.

2. Delivery\_Days — тапсырыс ресімделген сәттен бастап беру пунктіне түскенге дейінгі нақты жеткізу мерзімі (күнмен). Бұл көрсеткіш логистикалық тиімділікті сипаттайды.

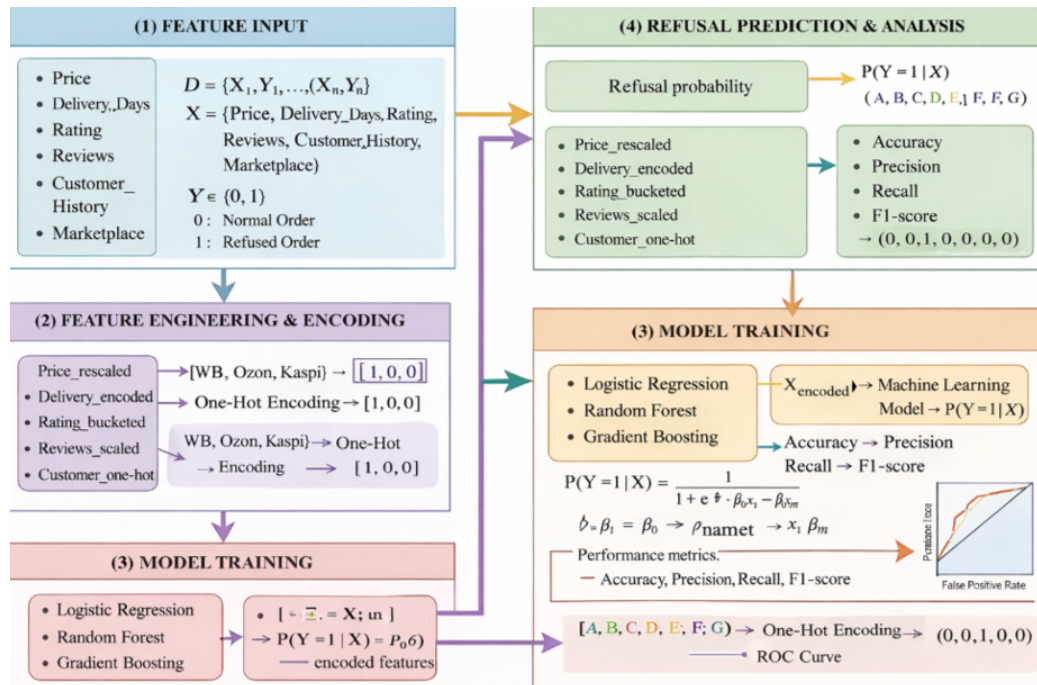
3. Rating — тауардың бес балдық шкала бойынша орташа пайдаланушылық бағасы. Айнымалы өнімнің қабылданған сапасын көрсетеді.

4. Reviews — тауарға қалдырылған пікірлер саны. Көрсеткіш тауардың танымалдылығы мен оған деген сенімнің прокси-индикаторы қызметін атқарады.

5. Customer\_History — осы сатып алушының бұған дейін ресімдеген тапсырыстарының саны. Айнымалы лоялдылық деңгейін және платформамен өзара іс-қимыл тәжірибесін көрсетеді.

6. Refusal — бинарлы айнымалы: тауарды алғанға дейін немесе беру пунктінде бас тартқан жағдайда 1 мәнін, ал тапсырыс сәтті аяқталғанда 0 мәнін қабылдайды.

7. Marketplace — платформаны (Wildberries, Ozon, Kaspi) көрсететін номиналды айнымалы, модельдерді оқыту кезінде one-hot encoding әдісімен кодталады.



Сурет 2. Бас тартуларды болжау схемасы

2-суретте маркетплейстердегі тапсырыстардан бас тартуды болжау үшін қолданылатын аналитикалық жүйенің архитектурасы көрсетілген. Бұл жүйе төрт реттелген кезеңнен тұрады: кіріс белгілерін дайындау, белгілерді өңдеу және кодтау, модельді оқыту, және соңғы болжамды талдау.

Бірінші кезеңде (Feature Input) деректердің бастапқы жиынтығы  $D = \{(X_i, Y_i)\}_{i=1}^n$  қалыптасады, мұндағы  $X_i$  — тауар бағасын, жеткізу мерзімін, рейтингті, пікірлер санын, клиенттің сатып алу тарихын және маркетплейске тиесілілігін қамтитын тапсырыс белгілерінің векторы, ал  $Y_i \in \{0, 1\}$  — бас тарту фактісін көрсететін бинарлы нысаналы айнымалы. Сондықтан бұл мәселе бинарлы классификация есебі ретінде қарастырылады.

Екінші кезеңде (Feature Engineering & Encoding) бастапқы белгілер машиналық оқыту алгоритмдеріне ыңғайлы форматқа келтіріледі. Сандық көрсеткіштер масштабталады (мысалы, Price\_rescaled, Reviews\_scaled), уақытқа байланысты сипаттамалар кодталады, ал маркетплейс сияқты категориялық айнымалылар one-hot encoding әдісі арқылы түрлендіріледі. Мұндай өңдеу әртүрлі өлшем бірліктерінің әсерін азайтып, категориялық деректерді модельге тиімді енгізуге мүмкіндік береді.

Үшінші кезең (Model Training) бірнеше классификация алгоритмдерін оқытуды қамтиды. Базалық модель ретінде келесі формула бойынша бас тарту ықтималдығын бағалауды жүзеге асыратын логистикалық регрессия қолданылады:

$$P(Y = 1 | X) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m)}}$$

Сызықтық емес байланыстарды анықтау үшін ансамбльдік әдістер, яғни Random Forest және Gradient Boosting алгоритмдері қолданылады. Бұл алгоритмдер бірнеше шешім

ағаштарын құрып, олардың нәтижелерін біріктіру арқылы жұмыс істейді. Осындай тәсіл модельдің тұрақтылығын арттырып, жіктеу нәтижесінің дәлдігін жақсартады.

Қорытынды кезеңде (Refusal Prediction & Analysis) модель әр тапсырма бойынша бас тарту ықтималдығын  $P(Y = 1 | X)$  есептейді. Алынған нәтижелерді бағалау үшін бірнеше көрсеткіш қолданылады. Олардың ішінде Accuracy, Precision, Recall және F1-score бар. Сонымен қатар ROC-кисық құрастырылып, оның астындағы аудан (AUC) есептеледі. Бұдан бөлек, бас тарту себептері (A–G) вектор түрінде белгіленіп, бір тапсырмада бірнеше себептің болуы да ескеріледі.

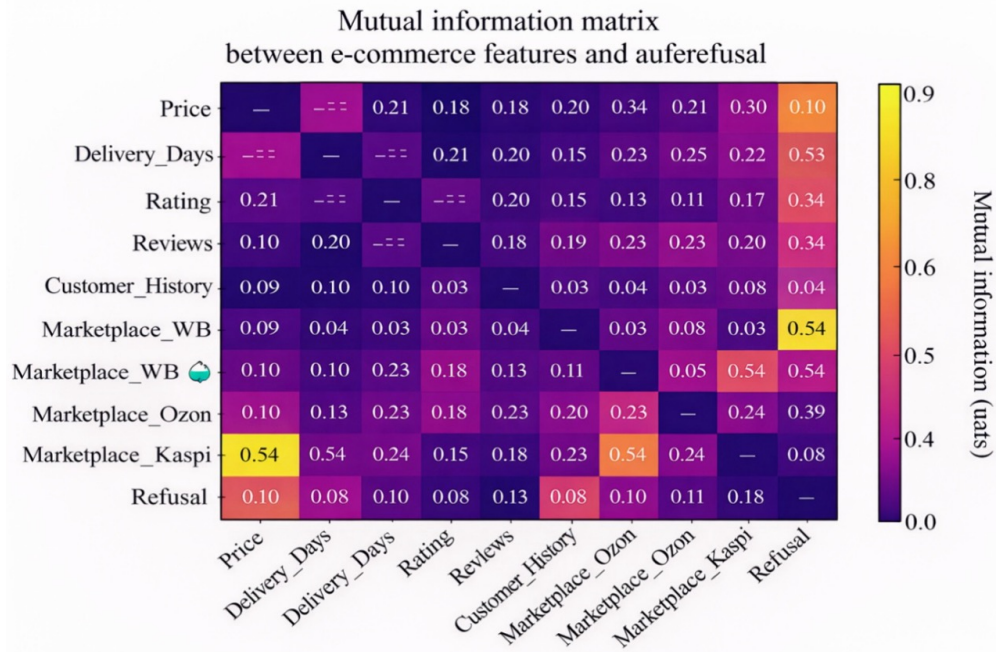
Ұсынылған схема деректерді бастапқы белгілерден бастап, соңғы болжау нәтижесін алғанға дейінгі барлық талдау кезеңдерін көрсетеді. Мұндай жүйе бас тарту ықтималдығын алдын ала анықтауға және оны тиімді басқаруға көмектеседі. Нәтижесінде маркетингте шешім қабылдауды қолдайтын жүйені жасауға мүмкіндік туады.

**Нәтижелер мен талқылаулар.** Бұл зерттеуде машиналық оқыту тек қосымша құрал емес, тапсырыстардан бас тарту ықтималдығын болжаудың негізгі әдісі ретінде қарастырылды. Алдымен деректер алдын ала өңдеуден өтті: тазартылды, категориялық белгілер кодталды және сандық айнымалылар нормализацияланды. Осыдан кейін Refusal бинарлы нысаналы айнымалысы бар оқыту деректер жиынтығы қалыптастырылды.

Классификация тапсырмасын шешу үшін үш негізгі алгоритм қолданылды: логистикалық регрессия, Random Forest және градиентті бустинг (Balaram et al., 2022: 10). Логистикалық регрессия базалық модель ретінде алынып, әрбір фактордың бас тартуға қаншалықты әсер ететінін түсінуге мүмкіндік берді. Бұл әдіс жеткізу мерзімі, тауар рейтингі және клиенттің сатып алу тарихы бас тарту ықтималдығына тікелей әсер ететінін көрсетті. Алайда, ол күрделі және сызықтық емес байланыстарды толық аша алмайды.

Random Forest әдісі бірнеше шешім ағаштарын құрып, олардың нәтижелерін біріктіру арқылы деректердегі күрделі байланыстарды жақсырақ анықтады. Бұл модель логистикалық регрессиямен салыстырғанда жоғары дәлдік көрсетті және жалған оң нәтижелердің санын азайтты. Белгілердің маңыздылығын талдау жеткізу уақытының ең маңызды фактор екенін, сонымен қатар тауар рейтингі мен пікірлер саны сатып алушының сенім деңгейіне әсер ететінін растады.

Ең жоғары нәтижені градиентті бустинг алгоритмі көрсетті. Бұл әдіс алдыңғы қадамдардағы қателерді біртіндеп түзетіп, модельдің дәлдігін арттырады. Нәтижесінде оның ROC-AUC көрсеткіші ең жоғары болды, яғни ол бас тарту ықтималдығы жоғары және төмен тапсырыстарды нақты ажырата алады. Бұл деректерде тек қарапайым емес, күрделі және өзара байланысқан факторлардың бар екенін дәлелдейді.



Сурет 3. Белгілер мен бас тарту айнымалысының корреляциялық матрицасы

Корреляциялық матрица модельдегі сандық белгілер мен «Refusal» (тапсырыстан бас тарту) айнымалысы арасындағы байланыс деңгейін көрсетеді. Қарапайым тілмен айтқанда, бұл бір көрсеткіштің өзгеруі екіншісіне қаншалықты әсер ететінін және қай факторлардың бас тартуға көбірек байланысты екенін анықтауға көмектеседі.

Матрицада бірнеше негізгі көрсеткіштер қарастырылады: тауар бағасы (Price), жеткізу мерзімі (Delivery\_Days), рейтинг (Rating), пікірлер саны (Reviews), клиенттің сатып алу тарихы (Customer\_History) және маркетплейске тиесілілігі. Корреляция коэффициенті  $-1$  мен  $+1$  аралығында өзгереді:

- оң мәндер көрсеткіштердің бірге өсетінін,
- теріс мәндер біреуі артқанда екіншісі азаятындығын,
- ал нөлге жақын мәндер әлсіз байланысты білдіреді (Magano et al., 2024: 5).

Талдау нәтижесі бойынша, ең айқын оң байланыс жеткізу мерзімі мен бас тарту арасында байқалды. Яғни, жеткізу уақыты ұзақ болған сайын тапсырыстан бас тарту ықтималдығы артады. Бұл логистиканың осы сегментте маңызды рөл атқаратынын көрсетеді. Ал тауар рейтингі мен бас тарту, сондай-ақ клиенттің сатып алу тарихы мен бас тарту арасында теріс байланыс анықталды. Бұл дегеніміз, рейтингі жоғары тауарлар мен бұрын жиі сатып алған клиенттерде бас тарту ықтималдығы төмен болады.

**Қорытынды.** Бұл зерттеуде тапсырыстардан бас тарту және қайтару себептері жүйеленіп, олардың пайда болу сипаты, қай кезеңде орын алатыны және қаншалықты басқаруға болатыны қарастырылды. Талдау нәтижесі көрсеткендей, себептердің бір бөлігі тұтынушының мінез-құлқы мен ақпаратты қабылдауына байланысты болса, екінші бөлігі платформадағы логистика мен қызмет көрсету сапасына тәуелді. Мысалы, өндірістік ақаулар немесе тапсырысты орындау кезіндегі қателіктер көбіне тауарды алғаннан кейін қайтаруға әкеледі. Ал жеткізу кешігуі немесе қызмет көрсету қолайсыздығы сияқты факторлар көбінесе тауарды алу кезеңінде бас тартуға себеп болады. Сонымен қатар, кейбір жағдайларда тұтынушының жеке шешімдері немесе күтпеген әрекеттері екі кезеңде де байқалып, қосымша тәуекел тудырады.

Ұсынылған жіктеу тек сипаттау үшін емес, деректерді құрылымдап, оларды талдауға және модельдеуге ыңғайлы форматқа келтіруге мүмкіндік береді. Басқаруға болатын және тұтынушыға байланысты факторларды бөлу компанияларға нақты шешімдер қабылдауға көмектеседі. Мысалы, тауар карточкаларын жақсарту, логистиканы жетілдіру, сапаны бақылау

жүйесін енгізу немесе тәуекелді бағалау модельдерін қолдану.

Осылайша, бұл жіктеу бас тартуды болжау модельдерін құруға негіз болады. Ол қарапайым бақылаудан аналитикалық болжауға өтуге мүмкіндік береді және бас тартуды кездейсоқ құбылыс емес, әртүрлі факторлардың әсерінен пайда болатын нәтиже ретінде қарастыруға жол ашады. Бұл маркетингтік стратегияларда бас тарту мен қайтару тәуекелдерін басқаруға арналған интеллектуалды жүйелерді дамытуға негіз болады.

Сонымен бірге, барлық бас тартуларды тек негативті факторлармен байланыстыру дұрыс емес. Кейбір жағдайларда сатып алушы заңды түрде өз құқығын пайдаланып, тауардан бас тартады. Онлайн саудада бұл – тұтынушыны қорғаудың маңызды бөлігі. Сондықтан бас тартудың белгілі бір үлесі жеке себептерге байланысты болады және оны толық болжау әрдайым мүмкін емес. Бұл адам факторын модельде ескеру қажет. Зерттеу нәтижелері құрылыс құралдары сегментінде сұраныстың маусымдық өзгерістерге тәуелді екенін де көрсетеді. Жыл мезгіліне байланысты онлайн сатылымдар мен бас тарту деңгейі өзгеруі мүмкін. Болашақта зерттеуді кеңейтіп, маусымдық факторларды және уақыттық деректерді талдау жоспарланып отыр. Бұл тұтынушылардың мінез-құлқын тереңірек түсінуге мүмкіндік береді. Жалпы алғанда, жиналған деректер көлемі жеткілікті, сондықтан оларды ұзақ мерзімді талдау үшін пайдалануға болады. Бұл деректер арқылы трендтерді, маусымдық өзгерістерді және тұтынушылар мінез-құлқындағы өзгерістерді анықтауға мүмкіндік бар. Сонымен қатар, уақыт бойынша салыстыру жүргізіп, қысқа мерзімді талдаудан толыққанды аналитикалық зерттеуге көшуге жағдай жасалады.

#### Әдебиеттер

- Дементьева, 2023 - Дементьева М.В. Проблемы правового регулирования маркетинговых в России; на примере Wildberries. Журнал Архонт, 2023. [https://cyberleninka.ru/article/n/problemu-pravovogo-regulirovaniya-marketpleysov-v-rossii-na-primere-wildberries?utm\\_source](https://cyberleninka.ru/article/n/problemu-pravovogo-regulirovaniya-marketpleysov-v-rossii-na-primere-wildberries?utm_source) [in Russ]
- Balaram, et al., 2022 - Balaram, A., et al. (2022). Bracketing of purchases to manage size uncertainty <https://doi.org/10.1002/nav.22048> [in Eng]
- Chen&Guestrin, 2016 - Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System (KDD) <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785> [in Eng]
- Janakiraman, Syrdal&Freling, 2016 - Janakiraman, N., Syrdal, H. A., & Freling, R. (2016). The Effect of Return Policy Leniency on Consumer Purchase and Return Decisions. <https://doi.org/10.1016/j.jretai.2015.11.003> [in Eng]
- Lundberg&Lee, 2017 - Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A Unified Approach to Interpreting Model Predictions (SHAP) [https://arxiv.org/abs/1705.07874?utm\\_source](https://arxiv.org/abs/1705.07874?utm_source) [in Eng]
- Magano, et al., 2024 - Magano, J., et al. (2024). Exploring Apparel E-Commerce Unethical Return Experiences <https://doi.org/10.3390/su16177303> [in Eng]
- Urbanke, Kranz & Kolbe, 2015 - Urbanke, P., Kranz, J., & Kolbe, L. (2015). Predicting Product Returns in E-Commerce: The Contribution of Mahalanobis Feature Extraction (ICIS 2015). [in Eng]
- Zhumakhan, 2024 - Zhumakhan A.M. Optimizing e-commerce customer service through AI: a case study of Wildberries. Международный научный журнал "Вестник науки" №11(80) Том 2, ноябрь 2024 <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizing-e-commerce-customer-service-through-ai-a-case-study-of-wildberries/viewer> [in Eng]

#### References

- Balaram, et al., 2022 - Balaram, A., et al. (2022). Bracketing of purchases to manage size uncertainty. *Naval Research Logistics*. <https://doi.org/10.1002/nav.22048> [in Eng]
- Chen&Guestrin, 2016 - Chen & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD 2016)*. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785> [in Eng]
- Dement'eva, 2023 - Dement'eva, M. V. (2023). Problemy pravovogo regulirovaniya marketpleysov v Rossii na primere Wildberries [Problems of legal regulation of marketplaces in Russia on the example of Wildberries]. *Zhurnal Arkhont*. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemu-pravovogo-regulirovaniya-marketpleysov-v-rossii-na-primere-wildberries> [in Russ]
- Janakiraman, Syrdal&Freling, 2016 - Janakiraman, N., Syrdal, H. A., & Freling, R. (2016). The effect of return policy leniency on consumer purchase and return decisions. *Journal of Retailing*. <https://doi.org/10.1016/j.jretai.2015.11.003> [in Eng]
- Lundberg&Lee, 2017 - Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. In *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. URL: <https://arxiv.org/abs/1705.07874> [in Eng]
- Magano, J., et al. (2024). Exploring apparel e-commerce unethical return experiences. *Sustainability*, 16(17), 7303. <https://doi.org/10.3390/su16177303> [in Eng]
- Urbanke, P., Kranz, J., & Kolbe, L. (2015). Predicting product returns in e-commerce: The contribution of Mahalanobis feature extraction. In *Proceedings of the International Conference on Information Systems (ICIS 2015)*. [in Eng]
- Zhumakhan, A. M. (2024). Optimizing e-commerce customer service through AI: A case study of Wildberries [Optimizatsiya obsluzhivaniya klientov elektronnoy kommertsii s pomoshchyu II: keis Wildberries]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal "Vestnik nauki"*, 11(80), Vol. 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizing-e-commerce-customer-service-through-ai-a-case-study-of-wildberries/viewer> [in Eng]

IRSTI 81.93.29

DOI: <https://doi.org/10.62687/STJ.1.2.2026.21>

## AI-POWERED ANALYSIS OF FIREWALL SYSTEMS FOR CORPORATE NETWORK PROTECTION

<sup>1,2</sup>G.Z. Ziyatbekova\*<sup>ID</sup>, <sup>3</sup>Wojcik Waldemar<sup>ID</sup>, <sup>2</sup>D. Zharkynuly<sup>ID</sup>, <sup>2</sup>Y.R. Ykласuly<sup>ID</sup>

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Politechnika Lubelska, Lublin, Poland

\*e-mail: ziyatbekova1@gmail.com

**G.Z. Ziyatbekova** – PhD, Associate Professor, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan; Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; Corresponding Author; e-mail: ziyatbekova1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9290-6074>

**Wojcik Waldemar** – Doctor of Technical Sciences, Professor; Department of Electronics and Information Technology, Politechnika Lubelska, Lublin, Poland; <https://orcid.org/0000-0002-0843-8053>

**D. Zharkynuly** – student of Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: zharkynulydaniyar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-6653-3057>

**Y.R. Ykласuly** – student of Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: rahatykylas18@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4617-3996>

**Abstract.** Modern cyber threats are characterized by a high degree of complexity and variability, which makes the task of protecting corporate networks from confidential data leakage especially relevant. Traditional approaches to information security are losing their effectiveness when faced with attacks based on anomalous user behavior and the use of covert communication channels. In this regard, the role of next-generation firewalls (NGFW) and intrusion detection and prevention systems (IDS/IPS) is increasing. This study is aimed at exploring the possibilities of integrating NGFW and IDS/IPS with machine learning technologies to enable intelligent analysis of network traffic. As part of the practical component, a module was developed in the Python programming language, based on the Random Forest algorithm, which provides automatic threat classification. The module was tested to see how well it works when people try to attack it. This was done to find out if it is really useful in the world. This work is, about keeping information safe and secure using artificial intelligence. We looked at the problems we are facing now with keeping data safe and we tried to come up with some solutions.

**Keywords:** NGFW, IDS/IPS, Random Forest, data protection, artificial intelligence, cybersecurity.

## AI КӨМЕГІМЕН КОРПОРАТИВТІК ЖЕЛІНІ ҚОРҒАУ ҮШІН БРАНДМАУЭР ЖҮЙЕЛЕРІН ТАЛДАУ

<sup>1,2</sup>Г.З. Зиятбекова\*, <sup>3</sup>Wojcik Waldemar, <sup>2</sup>Д. Жарқынұлы, <sup>2</sup>Р.Ы. Ықласұлы

<sup>1</sup>эл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>Люблин техникалық университеті, Люблин, Польша

\*e-mail: ziyatbekova1@gmail.com

**Г.З. Зиятбекова** – PhD, қауымдастырылған профессор, эл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: ziyatbekova1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9290-6074>

**Wojcik Waldemar** – т.ғ.д., профессор; Ақпараттық технологиялар және электроника кафедрасы, Люблин техникалық университеті, Люблин, Польша; <https://orcid.org/0000-0002-0843-8053>

**Д. Жаркынұлы** – Алматы технологиялық университетінің студенті, Алматы, Қазақстан; e-mail: zharkynulydaniyar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-6653-3057>

**Р.Ы. Ықласұлы** – Алматы технологиялық университетінің студенті, Алматы, Қазақстан; e-mail: rahatykylas18@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4617-3996>

**Андатпа.** Заманауи киберқауіптер жоғары күрделілік пен өзгермелілік деңгейімен сипатталады, бұл корпоративтік желілерді құпия ақпараттың сыртына шығуынан қорғау міндетін ерекше өзекті етеді. Ақпараттық қауіпсіздікке арналған дәстүрлі тәсілдер пайдаланушылардың атиптік мінез-құлқына және жасырын байланыс арналарының қолданылуына негізделген шабуылдармен бетпе-бет келгенде өз тиімділігін жоғалтады. Осыған байланысты келесі буындағы желіаралық экрандардың (NGFW) және шабуылдарды анықтау және алдын алу жүйелерінің (IDS/IPS) рөлі артып келеді. Осы зерттеу NGFW және IDS/IPS жүйелерін машиналық оқыту технологияларымен біріктіру мүмкіндіктерін зерттеуге, желілік трафикті интеллектуалды талдауды жүзеге асыруға және деректердің ықтимал сыртқа шығу арналарының анықтауға бағытталған. Тәжірибелік бөлім аясында Python бағдарламалау тілінде модуль әзірленді, оның негізінде қауіптерді автоматты түрде жіктеуді қамтамасыз ететін Random Forest алгоритмі жатыр. Модульдин тиімдилері мен нақты жағдайларда қолданыға жағамдылығын бағалау үшін әртүрлі шабуыл сценарийлерінде тестілей жүргізілді. Бұл жұмыста жеке дефектерді қайыпкіз және сенімді түрде жасанды интеллекттің көмегімен қорғай жағында айтылады. Осыған байланысты ұсынылған жұмыста дефектерді қайыпкіздіңе қатысты өзекті әлемдік мәселелер талданып, оларды шешу жолдары ұсынылады.

**Түйін сөздер:** NGFW, IDS/IPS, Random Forest, дефектерді қорғай, жасанды интеллект, киберқайыпкіздік.

## АНАЛИЗ СИСТЕМ БРАНДМАУЭРОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИИ

<sup>1,2</sup>Г.З. Зиятбекова\*, <sup>3</sup>Wojcik Waldemar, <sup>2</sup>Д. Жаркынұлы, <sup>2</sup>Ы.Р. Ықласұлы

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Люблинский технический университет, Люблин, Польша

\*e-mail: ziyatbekova1@gmail.com

**Г.З. Зиятбекова** – PhD, ассоциированный профессор, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; автор-корреспондент; e-mail: ziyatbekova1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9290-6074>

**Wojcik Waldemar** – д.т.н., профессор; кафедра электроники и информационных технологий, Люблинский технический университет, Люблин, Польша; <https://orcid.org/0000-0002-0843-8053>

**Д. Жаркынұлы** – студент Алматинского технологического университета, Алматы, Казахстан; e-mail: zharkynulydaniyar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-6653-3057>

**Ы.Р. Ықласұлы** – студент Алматинского технологического университета, Алматы, Казахстан; e-mail: rahatykylas18@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4617-3996>

**Аннотация.** Современные киберугрозы характеризуются высокой степенью сложности и вариативности, что делает задачу обеспечения защиты корпоративных сетей от утечки конфиденциальной информации особенно актуальной. Традиционные подходы к информационной безопасности утрачивают эффективность при столкновении с атаками, основанными на атипичном поведении пользователей и использовании скрытых каналов коммуникации. В связи с этим возрастает роль межсетевых экранов нового поколения (NGFW) и систем обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS). Настоящее исследование направлено на изучение возможностей интеграции NGFW и IDS/IPS с технологиями

машинного обучения для реализации интеллектуального анализа сетевого трафика и выявления потенциальных каналов утечки данных. В рамках практической части разработан модуль на языке программирования Python, в основе которого лежит алгоритм Random Forest, обеспечивающий автоматическую классификацию угроз. Проведено тестирование модуля на различных сценариях атак для оценки его эффективности и применимости в реальных условиях. В данной работе рассматривается защита персональных данных с использованием искусственного интеллекта, обеспечивающая их безопасность и надежность. В связи с этим в представленном исследовании проанализированы актуальные мировые проблемы, связанные с безопасностью данных, и предложены пути их решения.

**Ключевые слова:** NGFW, IDS/IPS, Random Forest, защита данных, искусственный интеллект, кибербезопасность.

**Introduction.** In the context of the modern digital world, the issue of personal data protection has surpassed the usual approaches, achieving a qualitatively high level of development in terms of the application of artificial intelligence (AI) technologies. Based on empirical data, it has been confirmed that, while human factors and passwords are still considered major factors in the occurrence of cyberattacks, AI systems help to eliminate these factors through the fast processing of large amounts of data and the accurate identification of anomalies. At the same time, the application of AI in biometric systems, such as fingerprints and Face ID, helps to achieve high accuracy in identifying the unique biological characteristics of an individual, thus reducing the risks of unauthorized access to personal data to a minimum. Most critically, the ability of AI to learn and improve helps to enhance the defense mechanisms in response to new cyber threats, thus making AI a critical factor in the maintenance of the integrity and confidentiality of the digital world at an intelligent level.

In the context of the overall digitalization process in the world, the role of information as a strategic asset has been recognized, and the issue of ensuring the security of this information represents a pressing scientific and technological challenge. It has been established that careless handling of personal data by users frequently leads to theft or dissemination of this data without authorization. Today, the level of public awareness with regard to the proper use of AI technologies is insufficient. The quick development of cyber threats, such as malware, phishing, etc., along with low digital literacy of users, indicates the shortcomings of traditional methods for protecting users. In this context, the goal of this research is to examine the role of AI technologies in the protection of personal data and their effectiveness in the modern information environment.

Artificial intelligence and personal data security: current state and principal threats. The extensive use of AI technologies in digital services, which started in 2020, should be noted. Before the introduction of AI technologies, users mostly used various gadgets, such as smartphones, personal computers, and external devices, for storing personal data. Nevertheless, the issue of theft and leakage of this data without authorization has been persistently relevant (Bishop 2006:738).

One of the main contributors to this problem is the lack of adequate adherence by users to information security guidelines. In particular, the use of inadequate passwords, such as those containing low-complexity characters, provides a conducive environment for a successful cyberattack. Information security studies have shown that inadequate passwords remain one of the top weaknesses of cyberattacks.

Generally, the comparative analysis of the problem shows that the implementation of AI technologies is consistent with a positive trend of increased data security (Figure 1). The implementation of AI technologies has led to the development of a modern concept of data security, where this technology is a part of modern cybersecurity. This technology allows for the precise detection of anomalies and suspicious deviations, which can be imperceptible even for a human eye, through the rapid analysis of large volumes of data.

In addition, this technology not only responds to cyberattacks but also takes a proactive stance by assessing possible cyberattack scenarios. In this case, the system promptly blocks any malicious activity, thereby developing a robust defense against cyberattacks. In terms of internal security, monitoring of user activity is carried out to prevent internal data breaches (Kaspersky Lab 2021:210). Most importantly, this technology constantly evolves against emerging hacking techniques, thereby

ensuring intelligent security for the digital ecosystem.



Figure 1. Artificial Intelligence as a Guarantee of Digital Security

Presently, the exploration of techniques for the safe storage of information using artificial intelligence is an extremely relevant issue. This is due to the capability of artificial intelligence to analyze large amounts of information from the internet. Therefore, it is logically imperative to establish security protocols using this form of intelligence. One of the advantages of using artificial intelligence is its capability to analyze large amounts of information within a short time. In addition, it is capable of automatically detecting suspicious activities. In particular, artificial intelligence is instrumental in the development of biometric-based authentications, which involve the use of distinctive biological features, especially where the need for the safe storage of confidential information is imperative (Kaspersky Lab, 2021:210). In particular, as shown in Figure 2, artificial intelligence is instrumental in the identification of an individual using images, especially where it deeply examines distinctive features, such as fingerprints. This makes it one of the safest techniques for the protection of information from misuse by other parties (Whitman et al., 2018:640; Sharda et al., 2020:832).



Figure 2. Types of AI-Based Biometric Protection: Fingerprint and Face ID Technologies

**Methodology.** *Analysis of Existing Solutions and NGFW Architecture.* From the time of the emergence of computer networks, the security of computer networks has been a primary issue of concern. The first generation of firewall technology introduced basic packet filtering technology based on a set of parameters. The parameters included source and destination IP addresses, port numbers, and network protocol types. The first generation of firewall technology operated at OSI protocol stack layer 3 and allowed data to be either allowed or blocked based on a set of parameters. This technology worked well in environments where network interactions were limited and threats were minimal.

With the increase in network infrastructure and the number of network devices, attackers began using complex attack strategies. The traditional firewall technology had functional limitations in this regard. Attackers began using complex strategies to attack computer networks. These strategies included sending malicious data in allowed protocol data units, using application-layer

attacks, and using encryption to hide malicious activity. These factors weakened the effectiveness of traditional security solutions against emerging threats. The emergence of cloud computing, virtualization technology, and mobile computing devices introduced fundamental changes in the network infrastructure of corporate entities. A distributed computing environment emerged, and BYOD and SaaS technologies widened the attack surface of computer networks. During this time, security needs also started to change in response to emerging threats.

Next-generation firewalls or NGFWs are really good, at helping with security. Next-generation firewalls do what regular firewalls do. They also have some extra features. These features include things that help stop people from getting in control over what apps can be used and smart ways to look at traffic. Next-generation firewalls can also look closely at each packet of data, control which apps are used check traffic that is encrypted including TLS 1.3 filter things based on who is using them and work with other systems that know about threats. NGFWs also offer in-depth packet inspection (DPI), application control, encrypted traffic inspection including TLS 1.3, user-level filtering, and integration with external threat intelligence capabilities. Thus, NGFWs represent a natural evolution in the development and delivery of cybersecurity products that offer multi-layered security capabilities on network, application, user, and content levels. This evolution is particularly relevant in the context of advanced persistent threats (APTs) used by both cybercrime syndicates and state actors. The inclusion of artificial intelligence and machine learning capabilities in NGFWs enables them to identify unknown threats through behavioral analysis and dynamic adaptation to changes in the evolving cyber risk landscape (Schneier 2015:784; Tsai et al. 2009:11994-12000).



Figure 3. Growth in the Number of Cyberattacks and Information Security Incidents (2010-2024)

The above graph (Figure 3) illustrates the exponential rise in recorded cybersecurity incidents over the last fifteen years, as per data provided by IBM X-Force and ENISA statistics. There is an evident link between the evolution of threats and the need to migrate from traditional firewalls to NGFWs. There is also a significant spike in incidents recorded after 2020, reflecting the onset of remote working, the emergence of cloud computing technologies, and increased APT syndicate activities.

**Discussion and Results.** *Architecture of Next-Generation Firewalls (NGFW).* The solution architecture for an NGFW solution would typically involve staged traffic processing, which would include session analysis, application identification, verification against known threat signatures, behavioral analysis, and finally, decision-making with regard to the permission or denial of the network connection. This is essentially an example of the solution architecture offered by Palo Alto Networks. In the context of the deployment of security systems within large-scale corporate entities, it is necessary to consider not only the potential threats, but also the architectural characteristics of the corporate network. For example, consider the hypothetical scenario with regard to the integration of a security system within a multinational corporation with a distributed infrastructure, including multiple data centers located across the world. The principal threats with regard to the corporate network would include distributed denial-of-service attacks, phishing, and information leak risks (Hamid et al. 2016: 1-22; Biswas et al. 2018: 101-114).

Initial Conditions:

The multinational corporation has a corporate network with thousands of users distributed

across different offices and data centers. The principal threats with regard to the corporate network would include distributed denial-of-service attacks, phishing, and information leak risks.

Implemented Measures:

1. Deployment of NGFW.

The next-generation firewalls were implemented to strengthen the security of the network perimeter, controlling applications while filtering at the application level. This measure offered protection from sophisticated attacks, including SQL injections, phishing, and DDoS, while at the same time providing increased transparency and visibility, thus facilitating early detection of anomalies.

2. Implementation of IDS/IPS.

To detect internal threats, an IDS/IPS system was integrated, thus providing the ability to detect anomalies at the network level. This measure allowed for the detection of unauthorized access, prevention of data leakage, and protection from compromising critical services.

3. Integration with SIEM.

This measure, which offers centralized management, is responsible for providing rapid response to emerging threats. The solution offers integration with other components, including NGFW and IDS/IPS, thus providing the ability to collect, correlate, and analyze security information from other components, while at the same time providing automatic responses to emerging threats (Kumar et al. 2019: 565-577; Dua et al. 2019: 117-121; Ashoor 2011: 497-501).

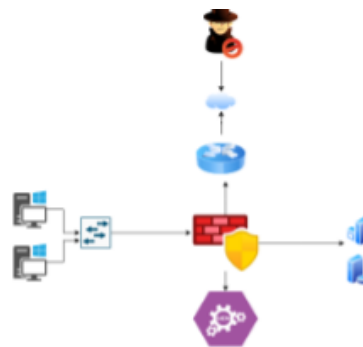


Figure 4. Architecture of the Tested Network

Due to the application of an integrated cybersecurity system, which included the NGFW, IDS/IPS, and alignment with the security information and event management system, the organization noticed the following positive results (Figure 4):

- A significant reduction in the success of attacks on the corporate network, due to the detection and prevention of cyberattacks;
- Increased accuracy in the detection of cyberattacks, due to the combined effect of multiple security tools and the application of machine learning algorithms, which improve the flexibility of the system to accommodate emerging complex cyberattacks;
- A reduction in false positives, which reduced the impact on business processes, due to the optimization of the system's configuration and the application of advanced anomaly detection techniques.

*Data Loss Prevention (DLP) Methods.*

The first function of NGFWs is the prevention of the leakage of confidential information.

The application of DLP tools is carried out using different techniques, which are:

- Signature-based data analysis, where specific patterns are identified;
- Content filtering, where specific keywords or templates are identified;
- Behavioral patterns, where specific patterns are identified by monitoring user behavior.

NGFW can prevent the delivery of sensitive data through an unsecured channel, block file uploads to the cloud, and monitor for insider attacks from authorized users. The NGFW market includes numerous vendors providing a variety of solution types. In this discussion we will explore

several popular solutions and their respective functionality; see the information in Table 1 for a summary of the comparison parameters used to evaluate the solutions discussed within this section of the report.

Table 1. Comparative analysis of firewall solutions

Parameter	Palo Alto Networks	pfSense	Mikrotik
Apt Detection	Yes	Partial	Partial
TLS 1.3 Support	Yes	Yes	Partial
Built-in Sandbox Analysis	Yes (WildFire)	Yes	Via AMP
ML/AI Support	Yes	Yes	No
Built-in DLP	Yes	Через модули	No
Threat Intelligence Integration	Automatic	Partial	No
TCO over 5 years (estimated)	Medium	Low	Low

After carefully analyzing the data provided, it is evident that the overall degree of integration of Palo Alto Networks is significantly high. The most distinguishing characteristics of this product are: (1) it has a high level of security because it is able to take advantage of TLS 1.3, (2) it allows the user to analyze what happens to their data using Machine Learning/Artificial Intelligence (ML/AI), (3) it protects against Advanced Persistent Threats (APTs), and (4) it provides the user with an effective means of doing sandbox analyses using the Wildfire platform. This product is frequently implemented within the infrastructures of Large Enterprise and Mission Critical information systems. Additionally, it automatically integrates with Global Threat Intelligence platforms enabling Palo Alto Networks-Based Next Generation Firewall (NGFW) solutions to dynamically respond to newly emerging threats automatically without requiring manual intervention from the administrator(s). Fortinet FortiGate solutions are both known for offering excellent throughput performance while being priced much lower than many competing alternatives. For those who work on tight budgets and require an acceptable level of protection as well as future growth possibilities, this combination will likely prove to be attractive. Also, since both TLS 1.3 and IPS capabilities are now part of the Fortinet portfolio, there may well be many medium size industries where Fortinet SOLUTIONS could represent a viable option for their environment. That said, their integration with external threat-analysis ecosystems tends to be less extensive than what is offered by some of the most prominent vendors in the market.

Cisco Firepower, by contrast, offers a broad set of options for security configuration and monitoring. Yet it appears to lag behind several competitors in a few consequential areas – most notably, more advanced machine-learning support and the availability of built-in data loss prevention (DLP) mechanisms. Moreover, AMP (Advanced Malware Protection) typically delivers sandboxing as a standalone capability through an additional integration process resulting in increased architectural complexity. Cost also plays an important role in the decision-making process; Cisco deployments tend to be significantly higher than competing vendors and thus many organizations will likely limit their adoption of Cisco based on price alone.

Check Point NGFW is known for its flexible and granular policy definitions as well as rich integration with Threat Intelligence. However, Check Point NGFW has partial implementation of its AI/ML capabilities and therefore the practical benefits derived from sandbox analysis depend greatly upon which licensing tier has been chosen by the user. Even with these limitations, Check Point remains a very flexible and resilient solution which explains its continued market presence (Singh et al. 2014:41-47; Hussain 2018: 289-29).

It can be concluded from the above comparisons that there is no single best solution to satisfy all operational environments. In general throughout the industry, selection criteria for an NGFW should be developed based upon the organization's specific requirements including at least:

- Importance of the protected resources to the organization
- The acceptable increase in network latency due to traffic inspection
- The available budget for both initial deployment of the NGFW & ongoing operations
- The necessary compatibility with current network/system monitoring & analysis tools.

According to the comparison performed, the analysis demonstrates the importance of the formal selection of products that adhere to a four-level selection methodology as shown in Figure 3. This methodology will compare the technical, security/functional, and economic features associated with a product. In conclusion, we can conclude that next-generation firewalls (NGFW) are an advancement over traditional firewalls. They will be better able to protect against multilayered attacks than conventional firewalls by utilizing deep packet inspection (DPI), application-layer security, threat intelligence integration, behavioural analytics and machine learning, and more advanced malware analysis through sandboxing.

The architecture of NGFWs continues to develop due to (i) the increasing trend of encrypted data being transmitted; (ii) the rise of cloud and mobile computing; and (iii) the increasing sophistication of modern attacks. SSL/TLS inspection (including TLS 1.3), application control and DLP (Data Loss Prevention) are now prevalent as they enable the identification of known malicious signatures as well as, more significantly, enabling the detection of suspicious behaviours that may identify developing threats on an immediate basis. This trend will strengthen the overall security posture of enterprise infrastructures (Sichkar et al. 2023:28-33; İş 2024: 12-20).

The four next-generation firewall (NGFW) products reviewed - Palo Alto Networks, Fortinet FortiGate, Cisco Firepower, and Check Point - all have unique advantages and disadvantages, reinforcing the need for a thoughtful, context aware selection approach (regardless of how this complicates procurement, it cannot be avoided). Hence, NGFWs are a key component of modern enterprise cybersecurity strategies, allowing organizations to adapt to changing threat environments and to enhance the effectiveness of their defenses through the use of more intelligent technologies.

**Threat Analysis: A Machine Learning Approach to Threat Analysis and Threat Detection.** As cyber threats have become increasingly numerous and sophisticated over the past few years, the ability to detect attacks in corporate networks is rapidly becoming a necessity rather than a luxury enhancement. Next-generation firewalls (NGFWs) – including Palo Alto systems – are often presented as one response to this challenge because they can identify and block threats through deep inspection of multiple traffic types. This chapter investigates machine learning techniques for analyzing the threat logs produced by a Palo Alto firewall. The threat logs contain detailed information about the network activity and therefore may help respond rapidly to incidents by providing incident detection support and even automation in some cases. This may significantly reduce response times when time is critical.

The primary goal of this research is to classify threats using the Random Forest algorithm on firewall log data. The Random Forest algorithm has been established as an effective classifier for large heterogeneous datasets and for constructing accurate and stable classifiers. The research is organized into multiple related tasks:

- Comparatively analyzing the effectiveness of firewalls
- Collecting and preprocessing Palo Alto threat logs for later use
- Training a Random Forest model on the prepared dataset for threat classification
- Evaluating the model quality based on accuracy, recall, precision, and F1-score
- Visualizing the results to facilitate the interpretation of the classification performance in practice.

More broadly, applying machine learning in this context may both accelerate detection workflows and improve classification fidelity – an outcome that is arguably critical for corporate network defense. The selection of Random Forest is driven (i.e., motivated) by its relative robustness to overfitting and its generally strong performance on large datasets, particularly when the feature space mixes categorical and continuous attributes.

*Comparative Analysis of Firewall Effectiveness.* Three different solutions (Palo Alto NGFW, pfSense, MikroTik RouterOS) were tested under a virtual environment (VMware ESXi version 7.0) to determine their effectiveness for overall security within an organization's computing environment.

The lab consisted of three separate networks - one for the potential attacker (Kali Linux), one for the protected computer/server where the application being exploited was located, and one for management. The appliances (Palo Alto NGFW, pfSense, MikroTik RouterOS) were all deployed to their default configurations with no “tweak” settings added for lab use. Attack traffic was generated using various tools in the Kali Linux distribution, including Metasploit, Nmap, sqlmap and hping3. The focus for the lab evaluation was the ability of the various types of devices to detect/prevent the following five types of attacks: Phishing/Social Engineering; Denial of Service (DOS); Exploiting Vulnerabilities; Malware; Exfiltration of Data. The outputs of the various devices were logged so that subsequent evaluation could take place using either the Palo Alto Web Ui and Threat Monitor, pfSense / Snort or Suricata / ClamAV, or MikroTik's built-in logging capabilities. This data was then analyzed; and the results of the testing were compiled and presented in comparative format with respect to each threat category (Singh et al., 2024: 12-15; Feng et al., 2021: 104763; Pandey et al., 2025: 595-600).

Simulated Common Phishing/Social Engineering Processes Identified Through First Test: User Accessing Phishing Websites via Clicking Links; Receiving Malicious Email; Attempting to Download File(s) From Phishing/Scam Websites - This Represents The Typical Risk To Organizations On A Daily Basis. The Reporting Software By Palo Alto Networks Was The Best Performing Product With 98% Of Threats Detected; This Is Possibly Due To The Use Of AI Based URL Filtering And Their Integration With A Large Scale Global Malicious Domain Database. The Reporting Software By pfSense Detected 85% Of Threats Through Signature-Based Detection And DNSBL Filtering. Reporting Software By MikroTik Was Less Effective With The Lowest Rate Of Threat Detection 60% Of Threats Detected ; This Primarily Comes From Blacklisting Sites In A Static Manner.

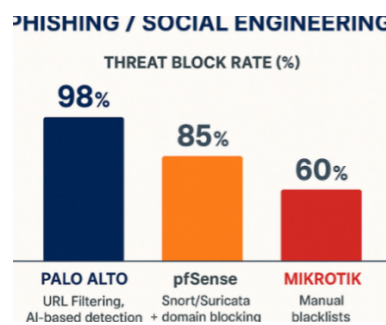


Figure 5. Phishing Processing Results

Resilience to DDoS activity was assessed via the second scenario. Both hping3 and Slowloris were used to " generate " SYN flood attacks and HTTP request floods. Palo Alto was able to block approximately 95% of all malicious traffic through its DDoS Protection module ( cloud - based ) and automated mitigation processes; pfSense blocked approximately 80% of all malicious traffic with Suricata enabled alongside the standard pf filter ; MikroTik blocked approximately 70% of all malicious traffic ; however , MikroTik 's configuration with regard to queuing and filtering appeared particularly susceptible to HTTP flood patterns.

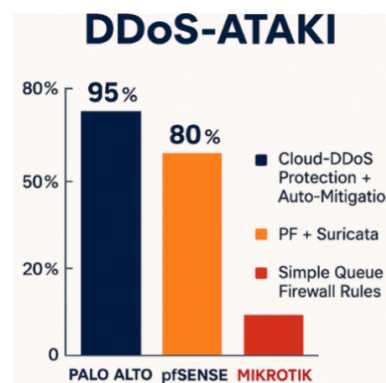


Figure 6. DDoS Effectiveness

In the 3rd test, we looked at protection for exploit attempts, RCE and zero - day style attacks (or tests emulating that behavior). Palo Alto gave us a very high success rate of 97%, which implies that they see advantages from their WildFire analysis engine and their Threat Prevention component. pfSense was able to achieve a 75% success rate based upon the Emerging Threats signatures being extended by Suricata. MikroTik did not have built-in IDS/IPS functionality and was able to mitigate approximately 50% of the simpler attacks being run against it which would be classified as very limited for protective capabilities. In the 4th test we looked at the ability to block malware delivery and execution. Palo Alto was able to provide nearly 100% protection (99%) with DNS Security and sandboxing . pfSense with the addition of ClamAV and Snort was able to achieve 82%. MikroTik, without being equipped with an integrated antivirus module was able to achieve 40% protection - this is not surprising given that testing with MikroTik devices produced three key limitations. Finally, we assessed effectiveness in stopping confidential data leakage. Palo Alto, using its DLP module to inspect multi-layer deep traffic, was able to prevent 96% of data leaks . pfSense was able to achieve 65%. MikroTik was able to stop only 30% due to the lack of deep inspection as well as content filtering capabilities. Taken together, these results indicate that richer inspection and dedicated prevention modules may materially improve coverage across threat categories – although, as always, operational context and configuration choices can influence outcomes.

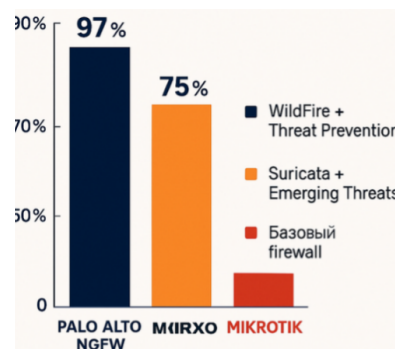


Figure 7. SQL Injection and Zero Day

*Example Code for Training a Random Forest Model.* Let's create an IDS/IPS model in Python using the scikit-learn library. Example code:

```
import pandas as pd
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import classification_report

dataset = pd.read_csv('network_traffic_data.csv')

features = dataset.drop('attack_type', axis=1) # Все параметры, кроме метки класса
target = dataset['attack_type'] # Тип выявленной угрозы

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    features, target, test_size=0.2, random_state=42
)

model = RandomForestClassifier(n_estimators=100, random_state=42)
model.fit(X_train, y_train)

predictions = model.predict(X_test)
print(classification_report(y_test, predictions))
```

*Example of implementing a Next-Generation Firewall (NGFW).* To strengthen the security of an information infrastructure, a Next-Generation Firewall (NGFW) may be integrated into an IDS/IPS architecture. In practice, this combination supports deep inspection of application-layer traffic – most

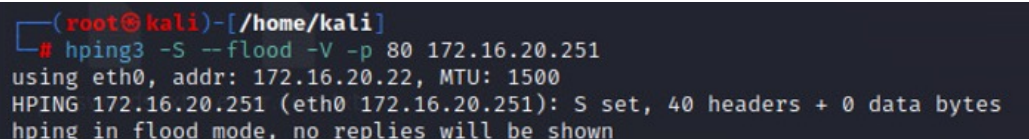
notably HTTP and HTTPS – which in turn enables more precise identification of suspicious behavior and more selective blocking of malicious flows through content filtering and signature-based analysis.

An illustrative case is the configuration of a Palo Alto firewall for traffic filtering:

```
set device-group <group-name> service-http-profile enable
set device-group <group-name> service-http-profile action allow
```

The relevant command of this security solution activates a security profile that filters out instructions based on the acceptable criteria when control logic is applied (e.g., only requests from approved sources, have the expected headers, contain approved content) and resulting requests to the appropriate destination (s) only if requested data corresponds with these predefined parameters. All requests not conforming to the original definitions will be denied access. Testing performed on the IDS/IPS systems was designed to find out if the NGFWs could detect and block real - world threats versus "textbook attacks." In order to facilitate this evaluation, a sample of frequently used attack types was constructed. All of the test attacks originated from Kali Linux; however, for realistic purposes, a Python script was created to combine multiple attack types into a single complete end-to-end attack scenario for evaluation purposes. Distributed Denial of Service (DDoS) attacks are aimed at consuming all of the available bandwidth and / or processing power of the intended target location in order to hinder or completely take down availability of the targeted location. DDoS attacks are not simply theoretical, but all too real; even if the service disruption is for only a few minutes, it can have significant direct costs in lost revenue, and also negatively impact the integrity and reputation of the attack victim 's business.

In the experiment, a DDoS scenario was simulated using the hping3 utility on Kali Linux. Because hping3 can craft arbitrary packets, it is well suited for reproducing patterns commonly associated with automated botnets. The specific method selected was a SYN flood – among the most widely observed DDoS techniques – in which a high volume of TCP SYN packets is transmitted without completing the three-way handshake. Predictably, this can deplete the server-side resources responsible for tracking half-open connections and, as a consequence, destabilize normal service operation.



```
(root@kali)-[~/kali]
└─# hping3 -S --flood -V -p 80 172.16.20.251
using eth0, addr: 172.16.20.22, MTU: 1500
HPING 172.16.20.251 (eth0 172.16.20.251): S set, 40 headers + 0 data bytes
hping in flood mode, no replies will be shown
```

Figure 8. Execution of a DDoS attack using the hping method

The purpose of the below command parameters is as follows : • Enter " sudo " as the command for execution with super user privileges needed to work with raw sockets or otherwise you will receive an error of : socket(): Operation not permitted .

- Flag " S " is set to enable TCP SYN flag to establish a connection.
- The flood mode will set to send the highest number of packets possible at one time.
- Enable " -V " to get verbose output as it is being processed.
- To specify a port number for the target system you will use " -p " , where " 80 " is the number for www (HTTP).
- " 172.16.20.251 " is the target system 's IP address.

While performing SYN Flood testing, the Palo Alto Network Security Platform detected potentially malicious traffic through Early Detection and acted on the anomalous behavior. The NFWG saw an increase in SYN packet ' s to Port 80 and saw a pattern that resulted in an increase in Packets received and flagged the event as a TCP Flood Attack. Based on the event logs, the NFWG recorded the following:

- Threat Type: TCP Flood Attack • Action Taken: Random Drop - Randomly select Packets to drop to lower the amount of traffic on the network.

- Source IP Address: 172.16.20.22 (the machine initiating the attack that is running Kali Linux)
- Destination IP Address: 172.16.20.251 (the machine being tested)
- Severity Level: High (or Critical depending on the security policy in place ). In response to this event, the NFW would cause the pre - configured flood protections to engage (primarily, outbound connection Limits and Dropping packets over an acceptable threshold). This allowed for the prevention of network overload and subsequent service disruption. The corresponding events were captured in the logs and presented in the management interface (Figure 6), which, taken together, suggests that the NGFW supported not only threat identification but also proactive mitigation (and, importantly, traceability for later review).

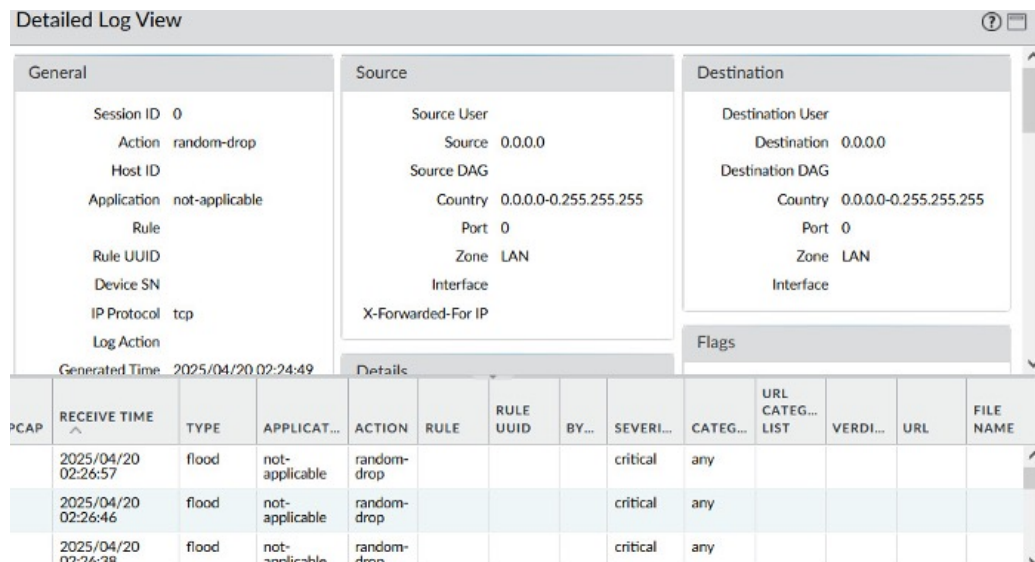


Figure 9. Response of the Palo Alto NGFW to a DDoS attack

Overall, the DDoS simulation indicated strong effectiveness of the Palo Alto NGFW in detecting and blocking this class of network threat. Through implementing a multi - faceted approach that integrated both signature-based and behavioral - based detection methods, the system was able to identify an anomaly or potential threat quickly (both in real - time) as TCP flood attack and activate established defenses to mitigate the impact of the attack. The system also documented all incident - related information in threat logs which will enable subsequent investigations of incidents logged as well as establish visibility into the event activities.

The associated information from test scenarios will be included in the training dataset that will be used for machine-based analysis of the threat ( protected by using a Random Forest algorithm ). In addition, this initiative will benefit the ongoing development of NGFWs when deployed in conjunction with an IDS/IPS solution through their ability to be sources of telemetry data that can provide definitive labels and related attributes of attacks. Therefore, the overall findings validate the effective utility of this type of solution for real - time resilient protection against denial of service attacks on corporate networks and associated risks.

Final Thoughts. The data support that the Palo Alto platform was found to provide greater capabilities than the other products in all the test scenarios and metrics evaluated. The embedded machine learning analysis (WildFire, DNS Security, and AI modules) resulted in a high rate of blocking APT, Zero-Day, and DLP attacks, and met the responsiveness criteria established for the test cases. pfSense produced strong results due primarily to its integration with Snort/Suricata and its ability to implement highly granular manual rule control, but it appears that additional refinements of pfSense will be necessary to achieve similar levels of effectiveness in more complex environments. In contrast, MikroTik had the capability to perform baseline filtering but showed significant limitations in protecting against advanced attacks. To enhance the degree of accuracy in the evaluation, a custom machine learning model was developed in Python using a Random Forest algorithm; this model was

trained based on the evaluation logs of the next-generation firewall and allowed for the categorization of additional threats, as well as identification of behavior anomalies from the logs and validation of predictive performance using confusion matrices and standard evaluation parameters (Precision, Recall, and F1-score).

Taken together, the study reinforces the importance of a layered approach to network security that combines strong NGFW filtering with intelligent data analysis. Integrating machine learning into the log-processing pipeline can meaningfully increase detection accuracy – especially in situations where attackers are likely attempting to bypass basic controls. The practical findings also suggest that deploying such solutions in corporate infrastructures can provide a high level of protection, assuming correct configuration and regular policy updates (a detail that is easy to overlook, but hard to overstate). More importantly, this research also illustrated the benefits of using detection methods after the fact to find attacks that could not have been detected in the current timeframe. Ultimately these results will provide a basis from which hybrid network security systems can be developed that integrate new-generation firewall technologies with contemporary artificial intelligence techniques, thereby creating more adaptive and scalable protection for businesses' information technology environments as cyber attacks continue to change.

### References

- Ashoor A.S., Gore S. Difference between intrusion detection system (IDS) and intrusion prevention system (IPS) // *Advances in Network Security and Applications: 4th International Conference, CNSA 2011, Chennai, India, July 15-17, 2011* 4. – Springer Berlin Heidelberg, 2011. – C. 497-501. [In Eng]
- Bishop, C.M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. – New York, NY: Springer, 2006. – 738 p. [In Eng]
- Biswas S.K. et al. Intrusion detection using machine learning: A comparison study // *International Journal of pure and applied mathematics*. – 2018. – Vol. 118. – No. 19. – Pp. 101-114. [In Eng]
- Dua M. et al. Machine learning approach to ids: A comprehensive review // *2019 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. – IEEE, 2019. – Pp. 117-121. DOI:10.1109/ICECA.2019.8822120 [In Eng]
- Feng R., Grana D., Balling N. Imputation of missing well log data by random forest and its uncertainty analysis // *Computers & Geosciences*. – 2021. – T. 152. – 104763 c. DOI:10.1016/j.cageo.2021.104763 [In Eng]
- Hamid Y., Sugumaran M., Balasaraswathi V. R. Ids using machine learning-current state of art and future directions // *British Journal of Applied Science & Technology*. – 2016. – Vol. 15. – No. 3. – Pp. 1-22. DOI:10.9734/BJAST/2016/23668 [In Eng]
- Hussain A. Use of Firewall and Ids To Detect and Prevent Network Attacks // *International Journal of Technical Research & Science*. – 2018. – T. 3. – C. 289-292. DOI:10.30780/IJTRS.V3.I9.2018.002 [In Eng]
- Iş H.A. Comprehensive Analysis of NGFWs for Cyber-Physical System Security After the CrowdStrike Incident // *2024 Global Energy Conference (GEC)*. – IEEE, 2024. – C. 12-20. DOI:10.1109/GEC61857.2024.10881876 [In Eng]
- Kaspersky Lab. *Cybersecurity and Artificial Intelligence: New Approaches to Threat Detection*. – Moscow: Kaspersky Research Center, 2021. – 210 p. [In Eng]
- Kumar I. et al. Development of IDS using supervised machine learning // *Soft Computing: Theories and Applications: Proceedings of SoCTA 2019*. – Springer Singapore, 2020. – Pp. 565-577. DOI:10.1007/978-981-15-4032-5\_52 [In Eng]
- Schneier, B. *Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C*. – 2nd Edition. – New York, NY: Wiley, 2015. – 784 p. [In Eng]
- Sharda, R., Delen, D., Turban, E. *Analytics, Data Science, and Artificial Intelligence: Systems for Decision Support*. – 11th Edition. – Hoboken, NJ: Pearson, 2020. – 832 p. [In Eng]
- Sichkar M., Pavlova L.A. short survey of the capabilities of Next Generation firewalls // *Computer Science and Cybersecurity*. – 2023. – №. 1. – C. 28-33. [In Eng]
- Singh A.P., Singh M.D. Analysis of host-based and network-based intrusion detection system // *International Journal of Computer Network and Information Security*. – 2014. – T. 6. – №. 8. – C. 41-47. [In Eng]
- Singh G., Gill K.S. AI-Enhanced Firewalls: Empowering Intrusion Detection with ML and DL // *2024 2nd International Conference on Advances in Computation, Communication and Information Technology (ICAICIT)*. – IEEE, 2024. – T. 1. – C. 12-15. [In Eng]
- Tsai C.F. et al. Intrusion detection by machine learning: A review // *expert systems with applications*. – 2009. – Vol. 36. – No. 10. – Pp. 11994-12000. DOI:10.1016/j.eswa.2009.05.029 [In Eng]
- Whitman, M.E., Mattord, H.J. *Principles of Information Security*. – 6th Edition. – Boston, MA: Cengage Learning, 2018. – 640 p. ISBN: 978-1-337-10206-3 [In Eng]

FTAXP 50.03.00

DOI: <https://doi.org/10.62687/STJ.1.2.2026.25>

## ҚАТАҢ ЕМЕС ШАРТТАРДА СЫЗЫҚТЫ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІ ПРАКТИКАЛЫҚ ІЗГЕ ТҮСІРУДІ БАСҚАРУ ӘДІСТЕРІ

<sup>1</sup>А.К. Ерденова<sup>ID</sup>, <sup>2</sup>Н. Тасболатұлы\*<sup>ID</sup>

<sup>1,2</sup>Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан

\*e-mail: [nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz](mailto:nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz)

**А.К. Ерденова** – PhD, Педагогикалық институт аға оқытушысы, Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: [erdenova\\_aigerim@mail.ru](mailto:erdenova_aigerim@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2936-5698>

**Н. Тасболатұлы** – PhD, қауымдастырылған профессор, Ақпараттық технологиялар және инженерия жоғары мектебі, Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: [nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz](mailto:nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-0511-7000>

**Аңдатпа.** Жоғары ретті сызықты емес жүйелер үшін, әсіресе белгісіздіктер мен уақыт бойынша айнымалы кешігулер жағдайында, практикалық ізге түсіруді қамтамасыз ету күрделі ғылыми мәселе болып табылады. Бұл жұмыста қатаң емес шарттарда жұмыс істейтін басқару әдістері ұсынылады. Зерттеу барысында біртекті үстемдік ету әдісі, қуат интеграторы техникасы және Ляпунов-Красовский функционалдары негізінде күй және шығыс кері байланыс контроллерлері синтезделді. Ұсынылған тәсіл жүйе параметрлеріндегі белгісіздіктер мен кешігулерді ескере отырып, басқару заңдарын құруға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер тұйық циклдік жүйенің барлық күйлерінің кең ауқымды шектелгендігін және ізге түсіру қателігінің ақырлы уақыттан кейін алдын ала берілген дәлдік аймағына жеткізілетіндігін теориялық түрде дәлелдейді. Ұсынылған әдіс қолданыстағы нәтижелермен салыстырғанда жүйеге қойылатын шарттардың әлсіретілуімен және жоғары ретті сызықты еместіктер жағдайында қолдану мүмкіндігімен ерекшеленеді. Әсіресе, параметрлік белгісіздіктер мен уақыт бойынша айнымалы кешігулер жағдайында жүйенің тұрақтылығын қамтамасыз ету және қажетті дәлдікпен ізге түсіру мәселелерін шешуде оның практикалық маңызы зор. Сонымен қатар, алынған теориялық нәтижелер ұсынылған тәсілдің әртүрлі инженерлік жүйелерде, соның ішінде робототехника, автоматтандырылған басқару жүйелері және энергетикалық процестерде қолдануға болатынын көрсетеді.

**Түйінді сөздер:** сызықты емес жүйелер, кері байланыс, практикалық ізге түсіру, орнықтылық, Ляпунов әдісі.

## CONTROL METHODS FOR PRACTICAL TRACKING OF NONLINEAR SYSTEMS UNDER NON-STRICT CONDITIONS

<sup>1</sup>A.K. Yerdenova, <sup>2</sup>N. Tasbolatuly\*

<sup>1,2</sup>Astana International University, Astana, Kazakhstan

\*e-mail: [nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz](mailto:nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz)

**A.K. Erdenova** – PhD, Senior Lecturer of the Pedagogical Institute, Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: [erdenova\\_aigerim@mail.ru](mailto:erdenova_aigerim@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2936-5698>

**N. Tasbolatuly** – PhD, Associate Professor, Higher School of Information Technologies and Engineering, Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: [nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz](mailto:nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-0511-7000>

**Abstract.** For high-order nonlinear systems, especially in the presence of uncertainties and time-varying delays, achieving practical output tracking is a challenging scientific problem. This paper proposes control methods operating under non-strict conditions. During the study, state- and

output-feedback controllers were synthesized based on the homogeneous domination approach, the power integrator technique, and Lyapunov-Krasovskii functionals. The proposed approach enables the construction of control laws while taking into account parameter uncertainties and time delays in the system. The obtained results theoretically prove that all states of the closed-loop system are uniformly bounded and that the tracking error converges to a predefined accuracy region after a finite time. Compared with existing results, the proposed method is characterized by relaxed assumptions on the system and applicability to high-order nonlinearities. In particular, it is highly effective in ensuring stability and achieving accurate tracking under parametric uncertainties and time-varying delays. Moreover, the theoretical results demonstrate that the proposed approach can be applied to various engineering systems, including robotics, automated control systems, and energy processes.

**Keywords:** nonlinear systems, feedback control, practical output tracking, stability, Lyapunov method.

## МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИМ ОТСЛЕЖИВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НЕСТРОГИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

<sup>1</sup>А.К. Ерденова, <sup>2</sup>Н. Тасболатұлы\*

<sup>1,2</sup>Международный университет Астана, Астана, Казахстан

\*e-mail: nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz

**А.К. Ерденова** – PhD, старший преподаватель педагогического института, Международный университет Астана, Астана, Казахстан, e-mail: erdenova\_aigerim@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2936-5698>

**Н. Тасболатұлы** – PhD, ассоциированный профессор, Высшая школа информационных технологий и инженерии, Международный университет Астана, Астана, Казахстан, e-mail: nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0511-7000>

**Аннотация.** Для нелинейных систем высокого порядка, особенно при наличии неопределённостей и переменных по времени задержек, обеспечение практического отслеживания выходных сигналов представляет собой сложную научную задачу. В данной работе предложены методы управления, функционирующие в условиях нестрогих ограничений. В ходе исследования синтезированы регуляторы состояния и выходной обратной связи на основе метода однородного доминирования, техники интегратора мощности и функционалов Ляпунова-Красовского. Предложенный подход позволяет формировать законы управления с учётом параметрических неопределённостей и временных задержек в системе. Полученные результаты теоретически доказывают, что все состояния замкнутой системы являются равномерно ограниченными, а ошибка слежения сходится к заданной области точности за конечное время. По сравнению с существующими результатами, предложенный метод характеризуется ослабленными предположениями относительно системы и применимостью к нелинейностям высокого порядка. В частности, он обеспечивает эффективную устойчивость и точное отслеживание при наличии параметрических неопределённостей и переменных задержек. Кроме того, теоретические результаты демонстрируют возможность применения предложенного подхода в различных инженерных системах, включая робототехнику, автоматизированные системы управления и энергетические процессы.

**Ключевые слова:** нелинейные системы, обратная связь, практическое отслеживание, устойчивость, метод Ляпунова.

**Кіріспе.** Соңғы жылдары жоғары ретті сызықты емес жүйелерді басқару мәселелері, әсіресе белгісіздіктер, уақыт бойынша айналымы кешігулер және толық емес өлшеулер жағдайында, басқару теориясының маңызды бағыттарының біріне айналды. Бұл жүйелер авиация, робототехника, биология, экономика және басқа да көптеген салаларда кездеседі.

Жоғары ретті сызықты емес жүйелер үшін басқару алгоритмдерін құру кезінде негізгі қиындықтар сызықты еместіктердің жоғары өсу ретімен, жүйе параметрлерінің белгісіздігімен

және уақыт бойынша кешігулердің болуымен байланысты. Бұл факторлар классикалық басқару әдістерінің қолданылуын шектейді және жаңа, әлсіз шарттарға негізделген тәсілдерді әзірлеуді талап етеді.

Қазіргі уақытта практикалық ізге түсіру мәселесіне ерекше назар аударылуда. Бұл тәсіл жүйе күйін нөлге дәл жеткізуді талап етпей, берілген дәлдік аймағына жеткізуді қамтамасыз етеді, сондықтан нақты жүйелер үшін тиімді болып табылады.

Осыған байланысты, бұл жұмыстың мақсаты - қатаң емес шарттарда жоғары ретті сызықты емес жүйелер үшін практикалық ізге түсіруді қамтамасыз ететін басқару әдістерін әзірлеу.

*Әдебиеттерге шолу.* Сызықты емес жүйелерді басқару теориясының дамуы Х. Халил (Khalil, 2002) және А. Исидори (Isidori, 2000) еңбектерінен бастау алады, онда орнықтылықты талдаудың негізгі құралдары ретінде Ляпунов әдісі кеңінен қарастырылған.

Сызықты емес жүйелерді басқарудың негізгі тәсілдерінің бірі – кері байланыс әдістері. Күй кері байланыс жүйені орнықтандыруды қамтамасыз етсе, шығыс кері байланыс толық күй өлшенбейтін жағдайларда бақылаушыларды қолдануды талап етеді. Бұл өз кезегінде басқару синтезін күрделендіреді.

Уақыт бойынша кешігулер жүйенің динамикасына елеулі әсер етеді және басқару жүйесінің орнықтылығын қамтамасыз етуді қиындатады.

Жоғары ретті сызықты емес жүйелер үшін тиімді басқару әдістеріне backstepping (кері қадамдық синтез), біртекті үстемдік ету және қуат интеграторы техникасы жатады. Бұл тәсілдер жоғары өсу реті бар сызықты еместіктер жағдайында басқару заңдарын құруға мүмкіндік береді.

Соңғы зерттеулерде практикалық ізге түсіру мәселесіне ерекше назар аударылуда. Мысалы, (Qian and Lin, 2002; Lin and Pongvuthithum, 2003; Yan and Liu, 2012; Sun et al., 2008; Polendo and Qian, 2007) жұмыстарында белгісіз параметрлері бар сызықты емес жүйелер үшін шығыс кері байланыс арқылы практикалық ізге түсіру қарастырылған.

Кең ауқымды практикалық бақылау – бұл кез келген бастапқы шарт үшін ізге түсіру қателігі жеткілікті аз болатындай, бірақ міндетті түрде нөлге жинақталмайтынды мәселені қарастырады. Бұл қателігі нөлге жинақталатын кең ауқымды асимптотикалық бақылаудан ерекшеленеді.

Шығыс бойынша кері байланыс әдістері күрделірек, өйткені контроллер барлық күйлерге емес, тек жүйенің шығысына қол жеткізе алады. Бұл өлшенбейтін күйді бағалау үшін бақылаушылардың жобасын қажет етеді, бұл жоғары ретті сызықты емес және уақыт бойынша кешігуі бар немесе өлшеу шуы сияқты қосымша факторлар болған кезде күрделене түседі.

Шығыс кері байланыс сонымен қатар күйлерді бағалау дәлдігіне әсер етуі мүмкін өлшеу шуларын және сәйкес келмейтін ауытқуларды да ескеруі керек. Мысалы келесі еңбектерде уақыт бойынша кешігуі бар сызықты емес жүйелер үшін адаптивті басқару және шығуды бақылау әдістері қарастырылған (Sun et al., 2013; Jia et al., 2015; BenAbdallah et al., 2013; Daniel et al., 2005; Hua et al., 2008). Негізгі назар белгісіз параметрлер, уақыттық кешігулер және сызықты емес әсерлер жағдайында орнықтылық пен практикалық траекторияны бақылауды қамтамасыз етуге бағытталған.

Уақыт бойынша кешігу физикалық процестерге, сигналды жеткізуге немесе есептеу ресурстарының шектеулеріне байланысты пайда болады. Ляпунов-Красовский функционалдарын қолдану кешігуі бар жүйелердің орнықтылығын талдаудың негізгі әдістерінің бірі болып табылады (Тасболатұлы және т.б., 2024).

Алайда, қолданыстағы жұмыстардың көпшілігінде уақыт бойынша айнаымалы кешігулер мен жоғары ретті сызықты еместіктер толық ескерілмейді, сондай-ақ жүйеге қойылатын шарттар жеткілікті түрде қатаң болып табылады.

Осыған байланысты, қатаң емес шарттарда жұмыс істейтін және жоғары ретті сызықты емес жүйелер үшін практикалық ізге түсіруді қамтамасыз ететін басқару әдістерін әзірлеу өзекті ғылыми мәселе болып табылады.

### Зерттеу материалдары мен әдістері.

Бұл жұмыста жоғары ретті сызықты емес жүйелер үшін күй кері байланыс негізінде кең ауқымды практикалық ізге түсіру есебі қарастырылады. Зерттелетін жүйе белгісіз параметрлермен және уақыт бойынша айнымалы кешігулермен сипатталады.

Басқару заңын синтездеу үшін таңба функциясы және қуат интеграторы әдісі қолданылады. Өзірленген контроллер нәтижесінде алынатын тұйық циклдық жүйенің барлық күйлері кең ауқымды шектелген болады. Сонымен қатар, шекті уақыттан кейін ізге түсіру қателігі жеткілікті аз болады.

Келесі түрдегі жоғары ретті сызықты емес жүйе қарастырылады:

$$\begin{cases} \dot{z}_i(t) = z_{i+1}^{p_i}(t) + \varphi_i(z(t), z_1(t - \tau_1), \dots, z_n(t - \tau_n)), & i = 1, \dots, n - 1, \\ \dot{z}_n(t) = u^{p_n}(t) + \varphi_n(z(t), z_1(t - \tau_1), \dots, z_n(t - \tau_n)), \\ y = z_1. \end{cases} \quad (1)$$

мұнда  $z(t) = [z_1(t), \dots, z_n(t)]^T \in R^n$  жүйенің күйі (немесе шешімі),  $z_{n+1}(t) := u(t) \in R$  кіріс контроллері,  $\tau_i \in R^+$ ,  $i = 1, \dots, n$  күйдің уақыт бойынша кешігуі және ол келесі шартты қанағаттандырады:  $\tau \geq \max\{\tau_1, \dots, \tau_n\}$ , жүйе  $z(\theta) = \xi_0(\theta)$ ,  $\forall \theta \in [-\tau, 0]$  бастапқы шартты қанағаттандырады, мұндағы  $\xi_0(\theta)$  -- берілген үздіксіз функция,  $\varphi_i : R^n \times R^n \rightarrow R$ ,  $i = 1, \dots, n$  белгісіз үздіксіз функция,  $p_i \in R_{\text{odd}}^{\geq 1} := \{p/q \mid p \geq q\}$ ,  $i = 1, \dots, n$  -- жүйенің жоғары дәрежесі, мұндағы  $p$  және  $q$  тақ бүтін сандар. Егер  $p_i = 1$  болса, (1) жүйе үшбұрышты формадағы уақыт бойынша кешігуі бар сызықты емес жүйеге келеді, оларды басқару конструкциясы кері қадам әдістемесі негізінде алынған бірнеше зерттеулері бар ([11-13] және т.б.).  $p_i > 1$  болғанда (1) жүйенің Якобиандық сызықтандырылуы координата басында басқарылмайтындығын байқауға болады, ал ол өз кезегінде кері байланыс негізінде сызықтандырылмайды.

Шығысты практикалық ізге түсіру келесі түрде анықталады:

(1) жүйенің  $y_r(t)$  тірек сигналы  $[0, +\infty)$  аралығында уақыт айнымалысы бойынша  $C^1$ -шектеулі болсын, онда күй контроллері арқылы шығысты кең ауқымды практикалық ізге түсіруді былай тұжырымдаймыз:

Кез келген  $\varepsilon > 0$  оң нақты саны үшін

$$u = u(z, y_r(t)) \quad (2)$$

үзіліссіз контроллері құрылады және ол төмендегі шарттарды қанағаттандырады:

1) (1)-(2) тұйық жүйенің барлық күйлері  $[0, +\infty)$  аралығында анықталған және кең ауқымды шектеулі болады;

2) Кез келген  $\varepsilon > 0$  оң саны үшін  $T > 0$  ақырлы уақытты табылып, (1)--(2) тұйық жүйенің  $y(t)$  шығысы

$$|y(t) - y_r(t)| = |z_1(t) - y_r(t)| < \varepsilon, \quad \forall t \geq T > 0 \quad (3)$$

шартын қанағаттандыратын болса, онда тұйық-циклдық жүйенің шығысы кең ауқымды практикалық ізге түсіріледі.

Шығысты кең ауқымды практикалық ізге түсіру мәселесін шешу үшін келесі болжамдарды қарастырамыз:

**Болжам I.** Әрбір  $i = 1, \dots, n$  үшін  $C_1, C_2 \geq 0$  және  $\omega \geq 0$  белгілі тұрақтылары табылып, келесі шарт орындалады:

$$|\varphi_i(z(t), z_1(t - \tau_1), \dots, z_n(t - \tau_n))| \leq C_1 \left( \sum_{j=1}^i |z_j(t)|^{\frac{r_i + \omega}{r_j}} + \sum_{j=1}^i |z_j(t - \tau_j)|^{\frac{r_i + \omega}{r_j}} \right) + C_2. \quad (4)$$

мұнда  $r_i$  келесі түрде анықталады:

$$r_1 = 1, \quad r_i = \frac{r_{i-1} + \omega}{p_{i-1}}, \quad i = 2, 3, \dots, n + 1. \tag{5}$$

$\frac{r_i + \omega}{r_j}$ -саны белгілі бір нүктеде емес, қайсыбір интервалда мән қабылдайды.

**Болжам 2.** (тірек сигналының шектеулілігі):  $y_r(t)$  тірек сигналы үздіксіз дифференциалданатын болса және сонымен қатар,  $D > 0$  оң белгісіз тұрақтысы табылып келесі теңсіздік орындалады:

$$|y_r(t)| + |\dot{y}_r(t)| \leq D, \quad \forall t \in [0, +\infty). \tag{6}$$

**Нәтижелер.** Қойылған мақсатқа жету үшін алдымен келесідей координат түрлендіруін енгізейік:

$$\begin{cases} x_k(t) = [z_k(t)]^{\frac{\sigma}{r_k}} - [\alpha_{k-1}(Z_{k-1}(t))]^{\frac{\sigma}{r_k}}, & k = 1, \dots, n, \\ \alpha_k(Z_k(t)) = -(\text{sign}(x_k(t)))^{p_k} g_k^{\frac{r_{k+1}}{\sigma}} |x_k(t)|^{\frac{r_{k+1}}{\sigma}}, & k = 1, \dots, n, \\ u(t) = \alpha_n(t), \\ y = x_1 + y_r(t). \end{cases} \tag{7}$$

мұнда  $\sigma - \sigma \geq \max\{r_i + \omega\}$  шартын қанағаттандыратын оң тұрақты,  $\alpha_k : R^k \rightarrow R$ ,  $k = 1, \dots, n$ ,  $g_k > 1$  оң тұрақтысы бар виртуалды контроллерлер деп аталады. Бірізділік үшін  $p_0 = g_0 = 1$ ,  $\alpha_0(t) = 0$  деп есептейміз.

$\sigma$  - жұп оң анықталған тұрақты сан болса, онда  $x_1(t) = z_1^{\sigma/r_1} \geq 0$  қарама-қайшылыққа келеміз, сондықтан  $\text{sign}$  таңба функциясын (7) координат түрлендіруіне енгізу арқылы  $x_1(t), \dots, x_n(t)$  барлық мүмкін мәндерін табуға болады.  $p_k \in R_{\text{odd}}^{\geq 1}$  тақ бүтін сан және  $\alpha_k(Z_k(t))$  өрнегінен  $\text{sign}(\alpha_k(Z_k(t))) = -\text{sign}(x_k(t))$  болатындығын аламыз. Демек келесі теңдік орынды болады:

$$\begin{aligned} [\alpha_{k-1}(Z_{k-1}(t))]^{\frac{\sigma}{r_k}} &= -\text{sign}(x_{k-1}(t)) \left| -(\text{sign}(x_{k-1}(t)))^{\frac{1}{p_{k-1}}} g_{k-1}^{\frac{r_k}{\sigma}} |x_{k-1}(t)|^{\frac{r_k}{\sigma}} \right|^{\frac{\sigma}{r_k}} \\ &= -\text{sign}(x_{k-1}(t)) g_{k-1} |x_{k-1}(t)| \\ &= -g_{k-1} x_{k-1}(t) \\ &= -\sum_{i=1}^{k-1} \left( \prod_{j=i}^{k-1} g_j \right) [z_i(t)]^{\frac{\sigma}{r_i}}. \end{aligned} \tag{8}$$

$r_i \leq r_i + \omega \leq \sigma$  болатындығын ескерсек (8) теңдеуден келесідей қорытынды жасауға болады:

$$[\alpha_1(x_1(t))]^{\frac{\sigma}{r_1}}, \dots, [\alpha_{n-1}(X_{n-1}(t))]^{\frac{\sigma}{r_n}}$$

функциясы  $t$  бойынша үздіксіз дифференциалданады, онда осының негізінде  $x_1(t), \dots, x_n(t)$   $t$  бойынша үздіксіз дифференциалданатын болады және бұдан түрленген жүйені аламыз.  $x_1(t), \dots, x_n(t)$   $t$  бойынша үздіксіз дифференциалдануы (7) түрлендіру арқылы нақты  $u(t)$  контроллерін құруды қамтамасыз етеді.

Ляпунов функциясын құрайық

$$W_{H_k}(Z_k(t)) = \int_{\alpha_{k-1}(Z_{k-1}(t))}^{z_k(t)} \left( [s]^{\frac{\sigma}{r_k}} - [\alpha_{k-1}(Z_{k-1}(t))]^{\frac{\sigma}{r_k}} \right) ds,$$

$$W_{D_k}(t) = (n - k + 1) \int_{t-\tau_k}^t x_k^2(l) dl + (n - k) \int_{t-\tau_{k+1}}^t x_k^2(l) dl, \quad k = 1, \dots, n; \tau_{n+1} = 0.$$

Бұл  $W_{H_k}(t)$ ,  $W_{D_k}(t)$  функциялары төмендегі тұжырыммен сипатталады.

Тұжырым 1.  $k = 1, \dots, n$  үшін  $W_{H_k}(t)$  және  $W_{D_k}(t)$  функциялары үздіксіз дифференциалданады және келесі теңдікті қанағаттандырады:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial W_{H_k}(Z_k(t))}{\partial z_k(t)} &= [x_k(t)]^{\frac{2\sigma - \omega - r_k}{\sigma}}, \\ \frac{\partial W_{H_k}(Z_k(t))}{\partial z_i(t)} &= - \int_{\alpha_{k-1}(Z_{k-1}(t))}^{z_k(t)} \left| [s]^{\frac{\sigma}{r_k}} - [\alpha_{k-1}(Z_{k-1}(t))]^{\frac{\sigma}{r_k}} \right|^{\frac{2\sigma - r_{k+1} p_k}{\sigma}} ds \\ &\quad \times \frac{2\sigma - r_{k+1} p_k}{\sigma} \frac{\partial}{\partial z_i(t)} \left( [\alpha_{k-1}(Z_{k-1}(t))]^{\frac{\sigma}{r_k}} \right), \quad i = 1, \dots, k-1, \\ \frac{dW_{D_k}(t)}{dt} &= (2n - 2k + 1)x_k^2(t) - (n - k + 1)x_k^2(t - \tau_k) - (n - k)x_k^2(t - \tau_{k+1}). \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$$2^{\frac{(2\sigma - \omega - r_k)(r_k - \sigma)}{\sigma r_k}} \cdot \frac{r_k}{2\sigma - \omega} |z_k(t) - \alpha_{k-1}(Z_{k-1}(t))|^{\frac{2\sigma - \omega}{r_k}} \leq W_{H_k}(Z_k(t)) \leq 2^{1 - \frac{r_k}{\sigma}} |x_k(t)|^{\frac{2\sigma - \omega}{\sigma}}.$$

$V_1 = W_{H_1} + W_{D_1}$  болатындай  $V_1$ -ді таңдап аламыз. Оның уақыт бойынша туындысын тауып, 1-тұжырымды қолдансақ мынаны аламыз:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= [x_1]^{\frac{2\sigma - \omega - r_1}{\sigma}} \alpha_1^{p_1} + [x_1]^{\frac{2\sigma - \omega - r_1}{\sigma}} (z_2^{p_1} - \alpha_1^{p_1}) + [x_1]^{\frac{2\sigma - \omega - r_1}{\sigma}} f_1 \\ &\quad + (2n - 1)x_1^2 - nx_1^2(t - \tau_1) \\ &\quad - (n - 1)x_1^2(t - \tau_2). \end{aligned} \quad (10)$$

1-болжам негізінде келесі бағалау орындалады:

$$\begin{aligned} [x_1]^{\frac{2\sigma - \omega - r_1}{\sigma}} \varphi_1 &\leq C |x_1|^{\frac{2\sigma - \omega - r_1}{\sigma}} \left( |x_1|^{\frac{\omega + r_1}{\sigma}} + |x_1(t - \tau_1)|^{\frac{\omega + r_1}{\sigma}} \right) \\ &\leq \left( C + \frac{2\sigma - \omega - r_1}{2\sigma} \left( \frac{\omega + r_1}{2\sigma} \right)^{\frac{\omega + r_1}{2\sigma - \omega - r_1}} C^{\frac{2\sigma}{2\sigma - \omega - r_1}} \right) x_1^2 + x_1^2(t - \tau_1) \\ &:= \beta_1 x_1^2 + x_1^2(t - \tau_1). \end{aligned} \quad (11)$$

Енді бірінші  $\alpha_1$  виртуалды контроллерді былай таңдап алайық:

$$\alpha_1^{p_1}(z_1) = -\text{sign}(x_1) g_1^{\frac{r_1 + \omega}{\sigma}} |x_1|^{\frac{r_1 + \omega}{\sigma}}. \quad (12)$$

мұнда  $g_1 = (3n - 1 + \beta_1)^{\frac{\sigma}{r_1 + \omega}} > 1$ . (11) мен (12) теңдіктерді қолданып (10) теңдікті былай жазуға болады:

$$\dot{V}_1 \leq -nx_1^2 - (n - 1) (x_1^2(t - \tau_1) + x_1^2(t - \tau_2)) [x_1]^{\frac{2\sigma - \omega - r_1}{\sigma}} (z_2^{p_1} - \alpha_1^{p_1}).$$

Бұдан рекурсивті қадамға көшсек,  $(k - 1)$ -ші қадамда

$$\begin{aligned} \dot{V}_{k-1} &\leq - (n - k + 2) \sum_{i=1}^{k-1} x_i^2 \\ &\quad - (n - k + 1) \sum_{i=1}^{k-1} (x_i^2(t - \tau_i) + x_i^2(t - \tau_{i+1})) \\ &\quad + [x_{k-1}]^{\frac{2\sigma - \omega - r_{k-1}}{\sigma}} (z_k^{p_{k-1}} - \alpha_{k-1}^{p_{k-1}}). \end{aligned} \quad (13)$$

Келесі қадамда  $V_k = V_{k-1} + W_{H_k} + W_{D_k}$  болатындай етіп,  $V_k$ -ны таңдаймыз. Оның

уақыт бойынша туындысын (1)-ші теңдеудің шешімінің төңірегінде тауып, (13) теңдеу мен 1-тұжырымды қолдансақ мынаны аламыз:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_k \leq & - (n - k + 2) \sum_{i=1}^{k-1} x_i^2 \\
 & - (n - k + 1) \left( \sum_{i=1}^k x_i^2(t - \tau_i) + \sum_{i=1}^{k-1} x_i^2(t - \tau_{i+1}) \right) \\
 & - (n - k)x_k^2(t - \tau_{k+1}) \\
 & + (2n - 2k + 1)x_k^2 \\
 & + [x_k]^{\frac{2\sigma - \omega - r_k}{\sigma}} (z_{k+1}^{p_k} - \alpha_k^{p_k}) + [x_k]^{\frac{2\sigma - \omega - r_k}{\sigma}} \alpha_k^{p_k} + [x_k]^{\frac{2\sigma - \omega - r_k}{\sigma}} f_k \\
 & + [x_{k-1}]^{\frac{2\sigma - \omega - r_{k-1}}{\sigma}} (z_k^{p_{k-1}} - \alpha_{k-1}^{p_{k-1}}) \\
 & - \frac{2\sigma - r_{k+1}p_k}{\sigma} \int_{\alpha_{k-1}(Z_{k-1}(t))}^{z_k(t)} \left| [s]^{\frac{\sigma}{r_k}} - [\alpha_{k-1}(Z_{k-1}(t))]^{\frac{\sigma}{r_k}} \right|^{\frac{\sigma - r_{k+1}p_k}{\sigma}} ds \\
 & \times \sum_{i=1}^{k-1} (x_{i+1}^{p_i} + f_i) \frac{\partial}{\partial z_i(t)} \left( [\alpha_{k-1}(Z_{k-1}(t))]^{\frac{\sigma}{r_k}} \right).
 \end{aligned} \tag{14}$$

Ары қарай  $\alpha_k$  виртуалды контроллерін құру үшін (14) теңдеудің оң жағындағы соңғы үш мүшесіне сәйкес шектеуші бағалау беру керек. Ол келесідей 3 лемманың негізінде қол жетімді болады.

*Лемма 1:* Оң тұрақты  $\beta_k$  табылып, келесі теңсіздік орындалады:

$$[x_{k-1}]^{\frac{2\sigma - \omega - r_{k-1}}{\sigma}} (z_k^{p_{k-1}} - \alpha_{k-1}^{p_{k-1}}) \leq 2^{1 - \frac{r_k + \omega}{\sigma}} |x_{k-1}|^{\frac{2\sigma - \omega - r_{k-1}}{\sigma}} |x_k| \leq \frac{1}{2} x_{k-1}^2 + \beta_{k1} x_k^2. \tag{15}$$

*Лемма 2:* Келесі бағалау орындалады:

$$\begin{aligned}
 [x_k]^{\frac{2\sigma - \omega - r_k}{\sigma}} f_k \leq & \beta_{k2} x_k^2 + \frac{1}{3} x_{k-1}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-2} x_i^2 \\
 & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} x_i^2(t - \tau_i) + x_k^2(t - \tau_k) \\
 & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-2} x_i^2(t - \tau_{i+1}) + x_{k-1}^2(t - \tau_k).
 \end{aligned} \tag{16}$$

*Лемма 3:*

$$\begin{aligned}
 & \left( \frac{2\sigma - r_{k+1}p_k}{\sigma} \int_{\alpha_{k-1}}^{z_k} \left| [s]^{\frac{\sigma}{r_k}} - [\alpha_{k-1}]^{\frac{\sigma}{r_k}} \right|^{\frac{\sigma - r_{k+1}p_k}{\sigma}} ds \cdot \sum_{i=1}^{k-1} (x_{i+1}^{p_i} + f_i) \frac{\partial}{\partial z_i} \left( [\alpha_{k-1}]^{\frac{\sigma}{r_k}} \right) \right) \\
 & \leq \beta_{k3} x_k^2 + \frac{1}{3} x_{k-1}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-2} x_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} x_i^2(t - \tau_i) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-2} x_i^2(t - \tau_{i+1}).
 \end{aligned} \tag{17}$$

Алынған нәтижелерді (14) қойып, мынаны аламыз:

$$\begin{aligned} \dot{V}_k \leq & -(n-k+1) \sum_{i=1}^k x_i^2 \\ & - (n-k) \sum_{i=1}^k x_i^2(t-\tau_i) - (n-k) \sum_{i=1}^{k-1} x_i^2(t-\tau_{i+1}) \\ & + [x_k]^{\frac{2\sigma-\omega-r_k}{\sigma}} \alpha_k^{p_k} + (2n-2k+1+\beta_k)x_k^2 \\ & + [x_k]^{\frac{2\sigma-\omega-r_k}{\sigma}} (z_{k+1}^{p_k} - \alpha_k^{p_k}), \end{aligned} \quad (18)$$

мұнда  $\beta_k = \beta_{k1} + \beta_{k2} + \beta_{k3}$ . Осылайша  $\alpha_k$  виртуалды контроллерін келесі түрде таңдап алайық:

$$\alpha_k^{p_k}(Z_k) = -\text{sign}(x_k) g_k^{\frac{r_k+\omega}{\sigma}} |x_k|^{\frac{r_k+\omega}{\sigma}}, \quad (19)$$

мұнда  $g_k = (3n-3k+2+\beta_k)^{\frac{\sigma}{r_k+\omega}} > 1$  -- оң тұрақты. Бұл индуктивті қадамды аяқтайды. Бұдан

$$\dot{V}_k \leq -(n-k+1) \sum_{i=1}^k x_i^2 - (n-k) \left( \sum_{i=1}^k x_i^2(t-\tau_i) + \sum_{i=1}^{k-1} x_i^2(t-\tau_{i+1}) \right) + [x_k]^{\frac{2\sigma-\omega-r_k}{\sigma}} (z_{k+1}^{p_k} - \alpha_k^{p_k}). \quad (20)$$

$k = n$  болғанда  $V_n : R^n \rightarrow R^+$  Ляпунов функционалы үшін

$$V_n(\cdot) = \sum_{i=1}^n (W_{H_i}(\cdot) + W_{D_i}(\cdot)) \quad (21)$$

болады.

Жоғарыда келтірілген индуктивті болжамды қолдана отырып,  $n$ -ші қадамда  $z_{n+1} = \alpha_n = u$  екенін ескеріп,  $\alpha_n : R^n \rightarrow R$  үздіксіз функциясын құра аламыз, бұдан  $u : R^n \rightarrow R$  контроллері келесі түрде алынады:

$$u(z) = -(\text{sign}(x_n))^{\frac{1}{p_n}} g_n^{\frac{1}{r_{n+1}}} |x_n|^{\frac{r_{n+1}}{\sigma}}. \quad (22)$$

Осыдан келесі бағалау алынады:

$$\dot{V}_n \leq - \sum_{i=1}^n x_i^2 + n\delta. \quad (23)$$

$$\begin{aligned} W_{H_k}(t) & \leq \left| [z_k(t)]^{\frac{\sigma}{r_k}} - [\alpha_{k-1}(Z_{k-1}(t))]^{\frac{\sigma}{r_k}} \right|^{\frac{2\sigma-r_{k+1}p_k}{\sigma}} \times |z_k(t) - \alpha_{k-1}(Z_{k-1}(t))| \\ & \leq 2^{1-\frac{r_k}{\sigma}} |x_k(t)|^{\frac{2\sigma-\omega}{\sigma}}. \end{aligned}$$

$\lambda = \frac{2\sigma-\omega}{\sigma}$  болсын. Сонда келесі шартты алуға болады:

$$\dot{V}_n \leq - \left( \frac{1}{2} V_n \right)^{\frac{1}{\lambda}} + n\delta. \quad (24)$$

Келесі түрдегі жиынды енгізейік

$$\Omega := \{x(t) \in R^n \mid V_n \geq 2(2n\delta)^\lambda\} \quad (25)$$

және  $x(t)-x(0)$  бастапқы күйі бар (7) жүйенің траекториясы болсын. Егер  $x(t) \in \Omega$  болса, онда (25)-тен мынау шығады:

$$\dot{V}_n \leq - \left( \frac{1}{2} V_n \right)^{\frac{1}{\lambda}} + n\delta \leq -n\delta < 0. \quad (26)$$

Бұл дегеніміз,  $x(t) \in \Omega$  болғанда,  $V_n - t$  уақыт өте келе қатаң кемімелі болады, демек  $x(t) \in R^n$  кеңістігінің  $\Omega$  толықтаушы жиынтығына ақырлы  $T > 0$  уақытында еніп, сол жерде мәңгі қалуы керек дегенді білдіреді. Бұдан (7) тұйық жүйенің  $x(t)$  шешімі  $[0, +\infty)$  аралығында анықталған және кең ауқымды шектелген болады. Енді (3) шарттың орындылығын (9), (24) қолданып, және  $\delta$  параметрін таңдау арқылы көрсетуге болады.

$$|y(t) - y_r(t)| = |x_1(t)| \leq V_n \leq 2(2n\delta)^{\frac{2\sigma-\omega}{\sigma}} < \varepsilon$$

Бұдан кез келген  $\varepsilon > 0$  үшін (22) түрдегі үздіксіз күй кері байланыс контроллері (3) шартты қанағаттандыратын шығысты кең ауқымды практикалық ізге түсіру есебін шешеді.

*Теорема.* Егер Болжам 1-2 орындалса, онда (22) түрдегі үздіксіз күй кері байланыс контроллері тұйық жүйенің барлық күйлерінің кең ауқымды шектелгендігін қамтамасыз етеді және ізге түсіру қатесінің ақырлы уақыттан кейін алдын ала берілген дәлдік аймағына жеткізеді.

Осылайша, ұсынылған басқару заңы (22) түрінде алынып, ол кең ауқымды практикалық ізге түсіру есебінің шешімін қамтамасыз етеді және теориялық түрде дәлелденеді.

Қарастырылған жүйе жалпы жүйенің жекелеген жағдайы болып табылады, бұл алынған нәтижелердің жалпылығы мен дұрыстығын көрсетеді.

Ұсынылған әдіс алдыңғы жұмыстармен салыстырғанда уақыт бойынша айнымалы кешігулер мен жоғары ретті сызықты еместіктерді бір мезгілде ескеруімен және жүйеге қойылатын шарттардың әлсіретілуімен ерекшеленеді.

### **Қорытынды.**

Бұл жұмыста уақыт бойынша айнымалы кешігулері, белгісіз параметрлері және жоғары ретті сызықты еместіктері бар жүйелер үшін кең ауқымды практикалық ізге түсіру есебі қарастырылды.

Ұсынылған әдіс жүйеге қойылатын шарттарды әлсіретумен және кешігу мен белгісіздік жағдайында басқарудың тиімділігін қамтамасыз етуімен ерекшеленеді.

Алынған нәтижелер тұйық циклдік жүйенің барлық күйлерінің кең ауқымды шектелгендігін және ізге түсіру қателігінің ақырлы уақыттан кейін алдын ала берілген дәлдік аймағына жеткізілетіндігін теориялық түрде дәлелдейді. Сонымен қатар, басқару заңының үздіксіз түрде құрылуы оның практикалық жүзеге асырылуын жеңілдетеді.

Алынған нәтижелер робототехникада, ұшқышсыз басқару жүйелерінде, энергетикалық және мехатроникалық қондырғыларда қолдануға перспективалы.

Болашақ зерттеулерде ұсынылған тәсілді көпайнымалы жүйелерге, желілік басқару құрылымдарына және кездейсоқ бұзылыстары бар жүйелерге кеңейту жоспарланады.

### **Әдебиеттер**

- BenAbdallah, Khalifa, Mabrouk, 2013 – BenAbdallah A., Khalifa T., Mabrouk M. Adaptive practical output tracking control for a class of uncertain nonlinear systems // International Journal of Systems Science. – 2013. – Vol. 44, Issue 8. – P. 1421–1431. [Eng.]
- Daniel, Li, Niu, 2005 – Daniel W., Li J.M., Niu Y.G. Adaptive neural control for a class of nonlinearly parametric time-delay systems // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2005. – Vol. 16, Issue 3. – P. 625–635. [Eng.]
- Hua, Wang, Guan, 2008 – Hua C.C., Wang Q.G., Guan X.P. Adaptive tracking controller design of nonlinear systems with time delays and unknown dead-zone input // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2008. – Vol. 53, Issue 8. – P. 1753–1759. [Eng.]
- Isidori, 2000 – Alberto Isidori A. Nonlinear systems. – 3rd ed. – NY.: Springer-Verlag, 2000. – 545 p. [Eng.]
- Jia, Li, Wen, 2015 – Jia Y., Li Y., Wen C. Adaptive output feedback control for nonlinear systems with time-varying delay // International Journal of Systems Science. – 2015. – Vol. 46, Issue 3. – P. 409–420. [Eng.]
- Khalil, 2002 – Hassan K. Khalil H.K. Nonlinear systems. – 3rd ed. – NJ.: Prentice-Hall, 2002. – 742 p. [Eng.]
- Lin, Pongvuthithum, 2003 – Wei Lin W., Pongvuthithum R. Adaptive output tracking of inherently nonlinear systems with nonlinear parameterization // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2003. – Vol. 48, Issue 9. – P. 1641–1653. [Eng.]
- Polendo, Qian, 2007 – Polendo J., Chengyu Qian C. A generalized homogeneous domination approach for global stabilization of inherently nonlinear systems via output feedback // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2007. – Vol. 17, Issue 7. – P. 605–629. [Eng.]

- Qian, Lin, 2002 – Chengyu Qian C.J., Wei Lin W. Practical output tracking of nonlinear systems with uncontrollable unstable linearization // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 2002. – Vol. 47, Issue 1. – P. 21–36. [Eng.]
- Sun, Liu, Xie, 2008 – Sun Z.-Y., Yongqiang Liu Y., Xie X. Adaptive practical output tracking control for high-order nonlinear uncertain systems // *Acta Automatica Sinica*. – 2008. – Vol. 34, Issue 8. – P. 984–989. [Eng.]
- Sun, Zhang, Xie, 2013 – Sun Z.Y., Zhang X.H., Xie X.J. Continuous global stabilization of high-order time-delay nonlinear systems // *International Journal of Control*. – 2013. – Vol. 86, Issue 6. – P. 994–1007. [Eng.]
- Yan, Liu, 2012 – Yan X., Yongqiang Liu Y. The further result on global practical tracking for high-order uncertain nonlinear systems // *Journal of Systems Science and Complexity*. – 2012. – Vol. 25. – P. 227–237. [Eng.]
- Тасболатұлы и др., 2024 – Тасболатұлы Н., Ерденева А.К., Назырова А.Е., Бахадирова Г.Б., Алишева С.С. Глобальное практическое отслеживание выходных данных для класса неопределенных нелинейных систем // *Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан*. – 2024. – № 1 (91). – С. 1–16. – DOI: <https://doi.org/10.47533/2024.1606-146X.13> [Russ.]

### References

- BenAbdallah, Khalifa, Mabrouk, 2013 – BenAbdallah A., Khalifa T., Mabrouk M. Adaptive practical output tracking control for a class of uncertain nonlinear systems // *International Journal of Systems Science*. – 2013. – Vol. 44, Issue 8. – P. 1421–1431. [Eng.]
- Daniel, Li, Niu, 2005 – Daniel W., Li J.M., Niu Y.G. Adaptive neural control for a class of nonlinearly parametric time-delay systems // *IEEE Transactions on Neural Networks*. – 2005. – Vol. 16, Issue 3. – P. 625–635. [Eng.]
- Hua, Wang, Guan, 2008 – Hua C.C., Wang Q.G., Guan X.P. Adaptive tracking controller design of nonlinear systems with time delays and unknown dead-zone input // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 2008. – Vol. 53, Issue 8. – P. 1753–1759. [Eng.]
- Isidori, 2000 – Isidori A. *Nonlinear systems*. – 3rd ed. – NY: Springer-Verlag, 2000. – 545 p. [Eng.]
- Jia, Li, Wen, 2015 – Jia Y., Li Y., Wen C. Adaptive output feedback control for nonlinear systems with time-varying delay // *International Journal of Systems Science*. – 2015. – Vol. 46, Issue 3. – P. 409–420. [Eng.]
- Khalil, 2002 – Khalil H.K. *Nonlinear systems*. – 3rd ed. – NJ: Prentice-Hall, 2002. – 742 p. [Eng.]
- Lin, Pongvuthithum, 2003 – Lin W., Pongvuthithum R. Adaptive output tracking of inherently nonlinear systems with nonlinear parameterization // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 2003. – Vol. 48, Issue 9. – P. 1641–1653. [Eng.]
- Polendo, Qian, 2007 – Polendo J., Qian C. A generalized homogeneous domination approach for global stabilization of inherently nonlinear systems via output feedback // *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. – 2007. – Vol. 17, Issue 7. – P. 605–629. [Eng.]
- Qian, Lin, 2002 – Qian C., Lin W. Practical output tracking of nonlinear systems with uncontrollable unstable linearization // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 2002. – Vol. 47, Issue 1. – P. 21–36. [Eng.]
- Sun, Liu, Xie, 2008 – Sun Z.Y., Liu Y., Xie X. Adaptive practical output tracking control for high-order nonlinear uncertain systems // *Acta Automatica Sinica*. – 2008. – Vol. 34, Issue 8. – P. 984–989. [Eng.]
- Sun, Zhang, Xie, 2013 – Sun Z.Y., Zhang X.H., Xie X.J. Continuous global stabilization of high-order time-delay nonlinear systems // *International Journal of Control*. – 2013. – Vol. 86, Issue 6. – P. 994–1007. [Eng.]
- Tasbolatuly et al., 2024 – Tasbolatuly N., Erdenova A.K., Nazyrova A.E., Bakhadirova G.B., Alisheva S.S. Globalnoe prakticheskoe otslezhivanie vykhodnykh dannykh dlya klassa neopredelennykh nelineinykh sistem // *Vestnik Natsionalnoi inzhenernoi akademii Respubliki Kazakhstan*. – 2024. – No. 1 (91). – P. 1–16. – DOI: <https://doi.org/10.47533/2024.1606-146X.13> [Russ.]
- Yan, Liu, 2012 – Yan X., Liu Y. The further result on global practical tracking for high-order uncertain nonlinear systems // *Journal of Systems Science and Complexity*. – 2012. – Vol. 25. – P. 227–237. [Eng.]

Редактор: Мырзабекова А.М. Верстка: Сексенова Ж.М. Подписано в печать: 31.03.2026 г.  
Издание: ТОО Международный университет Астана 010000, Казахстан, г. Астана, пр. Кабанбай  
батыра, 8, тел.: +7 (7172) 47-62-10 (214), e-mail: stj@aiu.edu.kz