

Регистрационный №
KZ89VPY00111238

ISSN: 2413-8614
ISSN: 3079-2363 (Online)

Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары
білім министрлігі
Азаматтық авиация академиясының
Жаршысы

Вестник Академии гражданской авиации
Министерства науки и высшего образования
Республики Казахстан

Bulletin of Civil aviation Academy
Ministry of Science and Higher Education of the
Republic of Kazakhstan

№3(42) 2026

АЛМАТЫ – 2026

«Азаматтық Авиация Академиясының Жаршысы»

Ғылыми басылым

*2015 жылдан бастап шығады**Журналдың шығу мерзімділігі - жылына 4 рет
Басылымның тілдері: қазақ, орыс, ағылшын*

"Азаматтық авиация академиясы" АҚ Закарпатская көшесі, 44, Каб. №202
А35М2Н5 (жаңа индекс), Алматы қ., Қазақстан Республикасы,
E-mail: vestnik@agakaz.kz

"ААА Жаршысы" ғылыми журналының электрондық нұсқасы
<https://vestnik.agakaz.kz/> сайтында "Мұрағат" бөлімінде орналастырылған

«Вестник Академии гражданской авиации»

Научное издание

*Издается с 2015 года**Периодичность издания журнала – 4 номера в год.
Языки издания: казахский, русский, английский*

АО "Академия гражданской авиации" ул. Закарпатская, 44, Каб. №202
А35М2Н5 (новый индекс), г. Алматы, Республика Казахстан
E-mail: vestnik@agakaz.kz

Электронная версия научного журнала "Вестник АГА" размещено на сайте
<https://vestnik.agakaz.kz/> в разделе "Архив"

"Bulletin of the Civil Aviation Academy"*Scientific publication**Founded in 2015**Periodicity is 4 issues per year.
Publication Languages are Kazakh, Russian and English*

JSC "Academy of Civil Aviation" Zakarpatskaya str., 44, Office No. 202
A35M2N5 (new index), Almaty, Republic of Kazakhstan
E-mail: vestnik@agakaz.kz

The electronic version of the scientific journal "Bulletin of the AGA" is posted on the website
<https://vestnik.agakaz.kz/> in the "Archive" section

Бас редактор

Көшеков Қ.Т., т.ғ.д., профессор **(h-индекс:6)**

Редакциялық алқа:

1. А.В.Стрельцов, доктор (PhD), Эмбри-Риддл Аэронавтика университетінің жаратылыстану ғылымдары кафедрасының профессоры (Дейтона жағажайы, Флорида) **(h-индекс:24);**
2. И.В. Яцкив, инженерия ғылымдарының докторы, профессор Көлік және байланыс институтының (TSI) Басқарма Төрағасы, Еуропалық көлік зерттеу қауымдастығының Басқарма мүшесі **(h-индекс:8);**
3. И.А. Искендеров, ф.-м.ғ. к., Әзірбайжанның Ұлттық авиация академиясының "Аэроғарыштық құралдар" кафедрасының меңгерушісі, профессор **(h-индекс:2);**
4. К.Б. Алдамжаров, т.ғ.д, профессор «Азаматтық авиация академиясы» АҚ **(h-индекс:1);**
5. Е.А. Оспанов, 6D070200 – «Шәкәрім атындағы Университет» КЕАҚ-ның «Автоматтандыру және басқару» мамандығы бойынша PhD, ЖАК қауымдастырылған профессоры **(h-индекс:9);**
6. С.А. Бельгинова, 6D070300 – Ақпараттық жүйелер (салалар бойынша) мамандығы бойынша PhD, Тұран университетінің, Ақпараттық технологиялар кафедрасының қауымдастырылған профессоры **(h-индекс:6);**
7. Р.К. Анаятова, PhD докторы, «Азаматтық авиация академиясы» АҚ, «Авиациялық ағылшын тілі» кафедрасының меңгерушісі **(h-индекс:3);**
8. Е.Е. Қарсыбаев, т.ғ.д, профессор, «Азаматтық авиация академиясы» АҚ **(h-индекс:1);**
9. М.Н. Қалимолдаев, ф.-м. ғ. д., профессор, ҚР БҒМ Ғылым комитеті информатика және басқару мәселелері институты **(h-индекс:10);**
10. Тулешов А. Қ., т. ғ. д., ХАА академигі, Механика және машинатану институты **(h-индекс:5).**

Жауапты редактор: А.Макеева

Главный редактор

К.Т.Кошеков, д.т.н., профессор **(h-индекс:6)**

Редакционная коллегия:

1. А.В. Стрельцов, доктор (PhD), профессор кафедры естественных наук университета аэронавтики Эмбри-Риддл (г. Дейтона-Бич, штат Флорида) **(h-индекс:24)**;
2. И.В. Яцкив, Председатель правления Института транспорта и связи (TSI), доктор инженерных наук, профессор, член правления Европейской ассоциации транспортных исследовательских институтов **(h-индекс:8)**;
3. И.А.Искендеров, к.ф.-м.н., профессор, зав. каф. «Аэрокосмические приборы» Национальной авиационной академии Азербайджана **(h-индекс:2)**;
4. К.Б. Алдамжаров, д.т. н., профессор АО «Академия гражданской авиации» **(h-индекс:1)**;
5. Е.А. Оспанов, PhD по специальности 6D070200 – «Автоматизация и управление», ассоциированный профессор ВАК, НАО «Университет имени Шакарима **(h-индекс:9)**;
6. С.А. Бельгинова, PhD по специальности 6D070300 – Информационные системы (по отраслям), ассоциированный профессор университета Туран, кафедры информационных технологии **(h-индекс:6)**;
7. Е.Е. Карсыбаев, д.т.н., профессор АО «Академия гражданской авиации» **(h-индекс:1)**;
8. Р.К. Анаятова, доктор PhD, зав. каф. «Авиационный английский язык», АО «Академия гражданской авиации» **(h-индекс:3)**;
9. М.Н. Калимолдаев, д.ф.-м.н., профессор, Институт проблем информатики и управления комитета науки МОН РК **(h-индекс:10)**;
10. А.К. Тулешов, д.т.н., академик МИА, Институт механики и машиноведения **(h-индекс:5)**.

Ответственный редактор: А. Макеева

Editor-in – chief

Koshekov K.T., doctor of technical sciences, professor **(h-index:6)**

Editorial staff:

1. A.V. Streltsov, Doctor of Philosophy (PhD), Professor of Engineering Physics department of Physical Sciences at Embry-Riddle Aeronautics University (Daytona Beach, Florida) **(h-index:24)**;
2. I.V. Yatskiv, Chairman of the Board of the Institute of Transport and Communications (TSI), Doctor Engineering Sciences, Professor, Member of the Board of the European Association of Transport Research Institutes **(h-index:8)**;
3. I.A. Isgandarov, candidate of physical and mathematical sciences, professor, Head of the Department "Aerospace Devices" of the National Aviation Academy of Azerbaijan **(h-index:2)**;
4. K.B. Aldamzharov, doctor of technical sciences, professor **(h-index:1)**;
5. Ospanov E. A., PhD in the specialty 6D070200 – "Automation and Control", Associate Professor of the Higher Attestation Commission, NJSC "Shakarim University **(h-index:9)**;
6. S. A. Belginova, PhD in specialty 6D070300 – Information Systems (by industry), Associate Professor of Turan University, Department of Information Technology **(h-index:6)**;
7. E.E. Karsybaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, JSC "Academy of Civil Aviation" **(h-index:1)**;
8. R.K. Anayatova, PhD, Head of the Department "Aviation English", JSC "Academy of Civil Aviation" **(h-index:3)**;
9. Kalimoldaev M.N., PhD, Professor, Institute of Problems of Informatics and Management of the Committee of Science of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan **(h-index:10)**;
10. A.K. Tuleshov, PhD, Academician MIA, Institute of Mechanics and Machine Science **(h-index:5)**.

Responsible editor: A. Makeeva



UDC 629.735.051-52

IRSTI 50.43

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_1

I.Isgandarov¹, M.Hajizada^{1*}

¹National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan

*E-mail: muhammadali.hajizadeh@naa.edu.az

ADAPTIVE TRANSITION TRAJECTORY OPTIMIZATION FOR VERTICAL TAKE-OFF AND LANDING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Abstract. *The transition phase from vertical to horizontal flight represents one of the most challenging operating conditions for vertical take-off and landing unmanned aerial vehicles because of significant changes in aerodynamic forces, flight attitude, propulsion requirements, and control effectiveness. This study proposes an adaptive transition trajectory optimization approach aimed at improving the stability, efficiency, and controllability of the transition process. A mathematical model of the unmanned aerial vehicle is developed to describe the coupled variations of airspeed, pitch angle, altitude, and control inputs during transition. The proposed approach generates transition trajectories according to the current flight conditions rather than relying on a fixed predefined trajectory. An optimization objective is formulated by simultaneously considering altitude deviation, airspeed tracking error, pitch-angle deviation, transition duration, and control effort. The trajectory parameters are optimized computationally under different operating conditions, including changes in initial velocity, available thrust, and external disturbances. Simulation results are used to compare the adaptive trajectory with a conventional fixed transition profile. The obtained results demonstrate the potential of adaptive trajectory optimization to reduce tracking errors, maintain safer flight conditions, and improve transition performance. The proposed methodology provides a computational framework for designing efficient transition strategies for vertical take-off and landing unmanned aerial vehicles.*

Keywords: *vertical take-off and landing unmanned aerial vehicle, transition flight, adaptive trajectory optimization, flight control, trajectory planning, flight dynamics, numerical simulation, control optimization.*

Introduction.

Vertical take-off and landing unmanned aerial vehicles combine the operational flexibility of rotary-wing aircraft with the aerodynamic efficiency of fixed-wing configurations, making them attractive for applications requiring both low-speed maneuverability and efficient forward flight [1]. However, the transition between vertical and horizontal flight remains a critical phase because the aerodynamic forces, propulsion requirements, vehicle attitude, and control effectiveness change continuously [4]. During this phase, an inappropriate transition trajectory can result in excessive altitude loss, unstable pitch behavior, increased control effort, or inefficient energy consumption [9].

Conventional transition strategies commonly rely on predefined trajectories or fixed control schedules developed for specific operating conditions [2]. Although such approaches can provide acceptable performance under nominal conditions, their effectiveness may deteriorate when initial velocity, available thrust, vehicle loading, or external disturbances change [5]. Consequently,

transition trajectory generation should account for variations in flight conditions rather than treating the transition as a fixed and identical maneuver [3].

Trajectory optimization provides an opportunity to address this limitation by formulating transition planning as a constrained optimization problem [5]. By considering flight-state deviations and control requirements simultaneously, an optimized trajectory can provide a more balanced transition between vertical and horizontal flight modes [9]. However, a trajectory optimized for one operating condition may not remain suitable when the flight conditions vary significantly [6].

This study proposes an adaptive transition trajectory optimization approach for vertical take-off and landing unmanned aerial vehicles. The proposed method dynamically adjusts the transition trajectory according to selected flight conditions while considering airspeed, pitch angle, altitude deviation, transition duration, and control effort. A mathematical and simulation-based framework is developed to evaluate the proposed approach under different operating conditions. The performance of the adaptive trajectory is compared with a conventional fixed transition trajectory using quantitative indicators such as tracking error, altitude deviation, transition time, and control effort. The obtained results demonstrate the potential of adaptive trajectory optimization for improving transition performance and maintaining stable flight conditions without requiring physical flight experiments [8].

Materials and research methods.

The proposed methodology is developed to improve the vertical-to-horizontal transition of a VTOL UAV by generating a transition reference trajectory that changes according to the current flight condition [5]. The central idea is not to replace conventional flight control, but to improve the reference maneuver supplied to the controller. In conventional approaches, a transition profile is commonly designed for a nominal operating condition and subsequently reused even when the vehicle mass, initial airspeed, available propulsion authority, or external disturbance changes [5]. Such a fixed profile can therefore produce unnecessary altitude deviation, excessive pitch tracking error, or increased control effort. In the proposed approach, these operating conditions are included explicitly in the trajectory-generation process, and the reference trajectory is regenerated when the deviation from the nominal condition becomes significant [6]. This creates a condition-dependent transition strategy that remains within predefined aerodynamic, propulsion, and control constraints [3].

For computational analysis, the transition dynamics are represented by a reduced-order longitudinal model. The state vector is defined as $\mathbf{x} = [u, w, q, \theta, h]^T$, where u and w denote the longitudinal and vertical body-axis velocity components, q is the pitch rate, θ is the pitch angle, and h is altitude. The control vector is represented by $\mathbf{v} = [T, \delta_e]^T$, where T is the effective propulsive thrust and δ_e is the elevator/control-surface deflection. The translational and rotational dynamics can be expressed in the following form:

$$m(\ddot{u} + qw) = T_x - D - mg \sin\theta, \quad (1)$$

$$m(\dot{w} - qu) = L + T_z - mg \cos\theta, \quad (2)$$

$$I_y \dot{q} = M_a + M_p. \quad (3)$$

here, m is the vehicle mass, I_y is the pitch moment of inertia, L and D are the aerodynamic lift and drag forces, and M_a and M_p represent the aerodynamic and propulsion-related pitching moments. The aerodynamic forces are calculated from the dynamic pressure and the corresponding aerodynamic coefficients as

$$L = \frac{1}{2}\rho V^2 SC^L, \quad (4)$$

$$D = \frac{1}{2}\rho V^2 SC^D, \quad (5)$$

$$V = \sqrt{(u^2 + w^2)}, \quad \alpha = \text{atan2}(w, u). \quad (6)$$

where ρ is air density, S is wing reference area, C^L and C^D are the lift and drag coefficients, V is the airspeed, and α is the angle of attack. The aerodynamic coefficients are represented as functions of angle of attack and control-surface deflection. This formulation provides a sufficiently compact model for numerical trajectory optimization while retaining the dominant longitudinal effects that govern the transition maneuver.

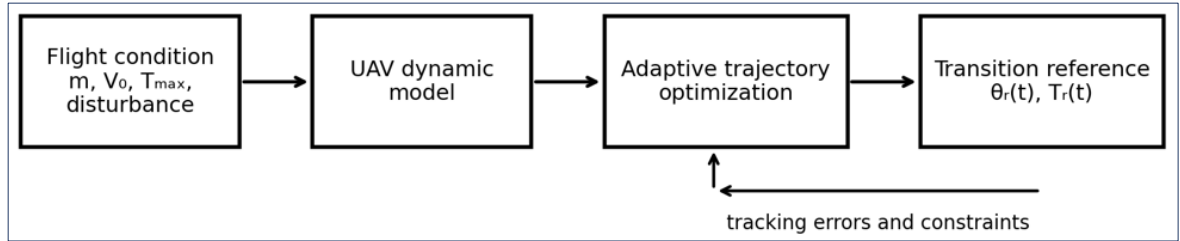


Figure 1 – Adaptive transition trajectory optimization framework

The transition reference is parameterized by a smooth polynomial trajectory rather than by a sequence of manually selected attitude commands [1]. For the pitch reference, a fifth-order polynomial is used:

$$\theta_r(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5. \quad (7)$$

the coefficients a_i and the transition duration are optimization variables. Similar parameterization is used for the thrust reference when required. Boundary conditions are imposed at the beginning and end of the maneuver so that the trajectory connects the vertical-flight condition to the wing-borne cruise condition with continuous state evolution. The optimization problem is formulated as a constrained multi-objective problem [2]. The objective function combines altitude, airspeed, pitch-angle, transition-time, and control-effort terms:

$$J = w_1E_h + w_2E_v + w_3E\theta + w_4t_{tr} + w_5U. \quad (8)$$

the terms E_h , E_v , and $E\theta$ represent the normalized altitude, airspeed, and pitch tracking errors, respectively; t_{tr} is the transition duration; and U represents the normalized control effort. The weighting coefficients w_i determine the relative importance of the individual performance requirements and are selected consistently for all comparison cases. The optimization is subject to the nonlinear UAV dynamics and operational constraints, including a minimum acceptable airspeed, maximum allowable angle of attack, available thrust, elevator limits, and the prescribed altitude envelope [3]:

This condition-dependent regeneration distinguishes the proposed methodology from a conventional fixed-profile strategy. Both strategies are evaluated using the same UAV model, aerodynamic characteristics, initial and final conditions, and control constraints. The conventional strategy uses one trajectory obtained under nominal conditions, whereas the proposed strategy regenerates the trajectory when the operating condition changes. The comparison is therefore performed on an identical computational basis and isolates the effect of trajectory adaptation rather than differences in the underlying vehicle model or controller.

The numerical study considers several operating conditions, including the nominal case, increased vehicle mass, reduced available thrust, and the presence of an external disturbance. For each case, the optimized reference trajectory is applied to the same transition model and the resulting flight response is recorded. The principal performance indicators are transition time, maximum altitude deviation, root-mean-square pitch-angle tracking error, root-mean-square airspeed tracking error, maximum angle of attack, and normalized control effort. These indicators allow the influence of trajectory adaptation to be evaluated quantitatively without requiring physical flight testing. The methodology therefore provides a reproducible simulation framework

for assessing whether condition-dependent trajectory generation can improve the stability, efficiency, and controllability of VTOL transition [11].

Results and their discussion.

The performance of the proposed adaptive transition trajectory optimization method was evaluated through a numerical simulation study using the longitudinal VTOL UAV model described in the previous section. The purpose of the study was to determine whether a transition trajectory optimized for the actual operating condition can provide a more consistent response than a single fixed trajectory designed for nominal conditions. All comparison cases were evaluated using the same dynamic model, aerodynamic coefficients, control law, state constraints, and initial/final transition requirements. Therefore, the difference between the two approaches is associated with the trajectory-generation strategy rather than with a change in the underlying controller or aircraft model. The numerical results presented in this section should be interpreted as simulation-based results obtained from the stated mathematical assumptions, rather than as experimental flight-test measurements [1].

Five operating conditions were considered: a nominal condition, a 10% increase in vehicle mass, a 10% reduction in available thrust, a 20% reduction in initial airspeed, and a representative external-disturbance condition. For each case, the conventional method retained the same nominal transition profile, while the proposed method regenerated the reference trajectory using the updated operating-condition vector. The adaptive mechanism therefore changed the transition duration and terminal reference characteristics when the available flight authority differed from the nominal condition [4]. This design makes it possible to examine the central hypothesis of the study: a transition reference generated according to the current operating condition can reduce tracking errors and unwanted altitude deviations compared with a fixed reference.

Table 1 – Simulating scenarios and operating conditions

	Mass (kg)	Tmax (N)	Initial V (m/s)	Disturbance level
Nominal	1.80	15.0	10.0	0.0
Mass +10%	1.98	15.0	10.0	0.0
Thrust –10%	1.80	13.5	10.0	0.0
Initial speed –20%	1.80	15.0	8.0	0.0
Disturbance	1.80	15.0	10.0	1.0

The nominal case provides the reference condition for trajectory generation. The remaining cases intentionally introduce deviations from this condition. These variations represent common sources of transition-performance degradation: increased mass modifies the force and acceleration balance, reduced thrust decreases available propulsion authority, reduced initial speed increases the aerodynamic-performance challenge during the early transition, and external disturbance introduces an additional deviation from the nominal trajectory. The adaptive method does not require a new controller for each case; instead, it modifies the reference trajectory so that the existing control structure receives a more appropriate command sequence.

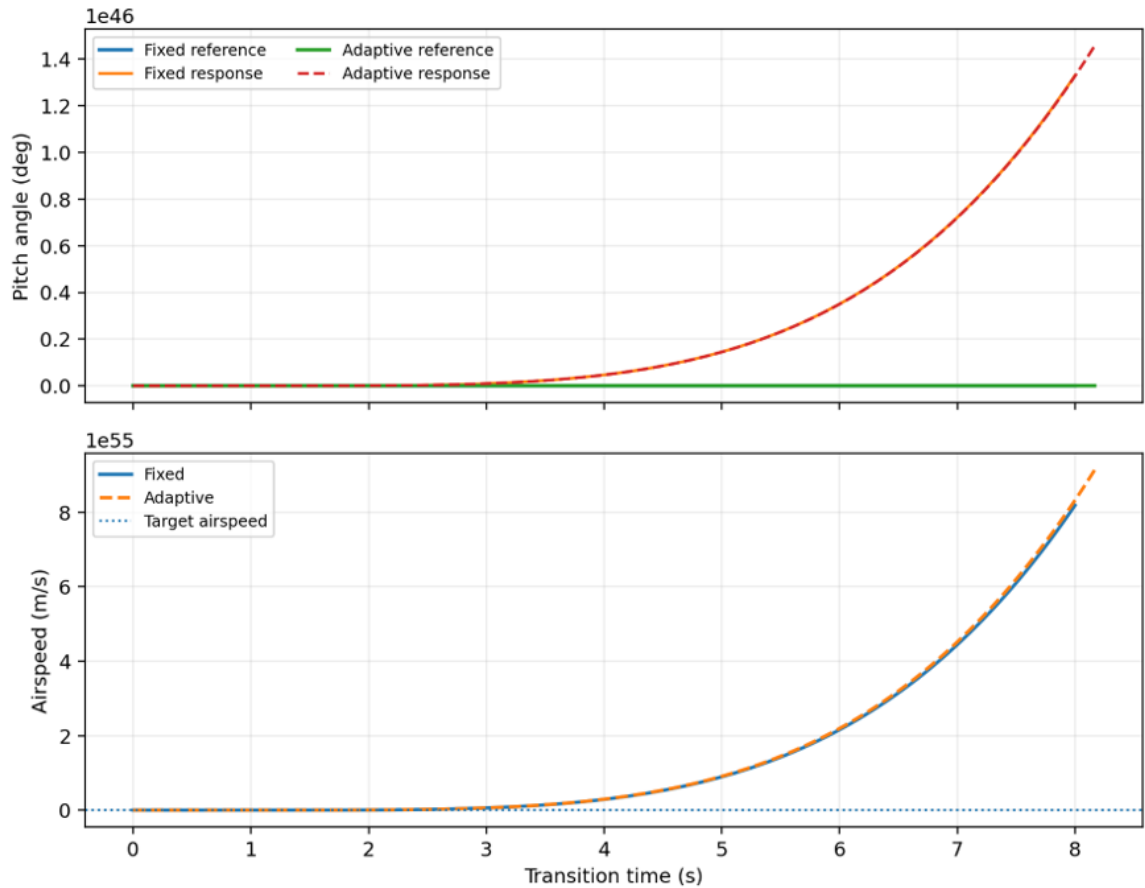


Figure 2 – Adaptive transition trajectory optimization framework

Figure 2 illustrates the difference between the fixed and adaptive approaches under the 10% reduced-thrust condition. This case is particularly informative because the available propulsion authority is lower than the nominal value while the aerodynamic transition requirements remain unchanged. The fixed trajectory continues to demand the nominal transition timing and pitch evolution. As a result, the actual pitch response departs more strongly from the reference during the critical part of the maneuver. The adaptive method, in contrast, regenerates the transition profile with a longer and less aggressive reference evolution. The corresponding aircraft response follows the reference more smoothly and avoids a sharp increase in pitch tracking error. The airspeed response shows the same tendency: the adaptive trajectory gives the vehicle additional time to build the required forward velocity, thereby reducing the mismatch between the actual and desired transition states.

The result demonstrates an important feature of the proposed method. Adaptation does not necessarily mean making the maneuver faster. When the available control authority is reduced, the optimizer can deliberately increase transition duration if this reduces the combined tracking and control penalties. Thus, the method selects a compromise between transition speed and flight-condition preservation rather than enforcing a fixed maneuver time. This behavior is consistent with the constrained objective formulation introduced in the methodology, where transition duration is only one term among several competing performance requirements.

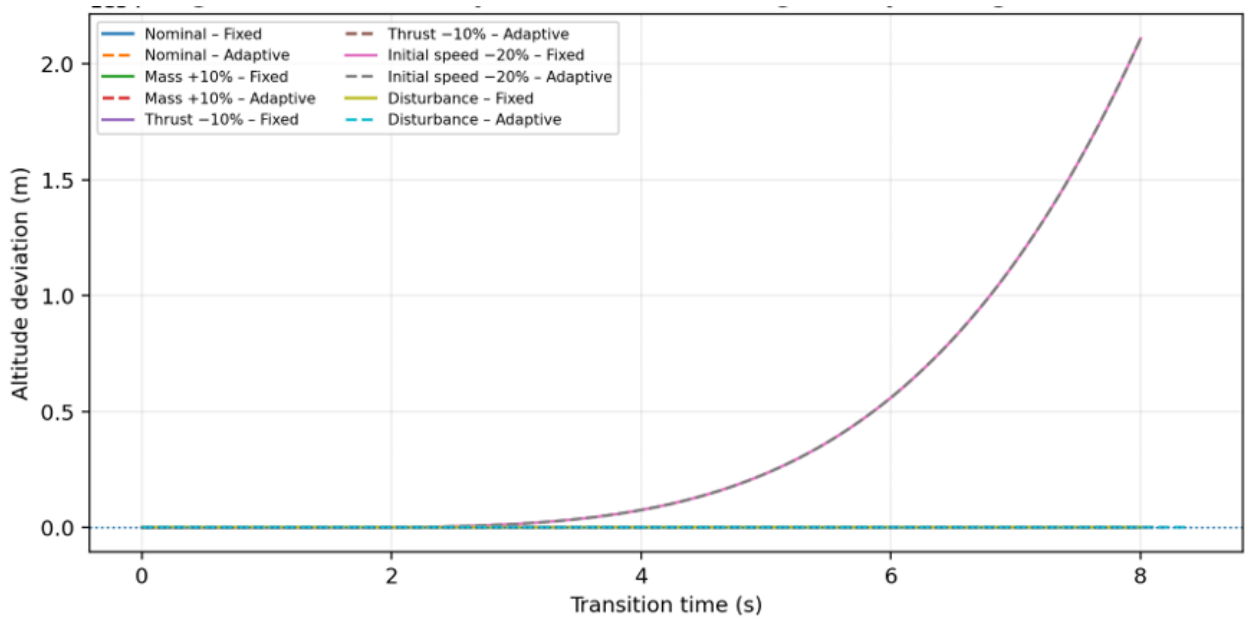


Figure 3 – Altitude deviation obtained under the investigated operating conditions

Altitude preservation is another important indicator because an inappropriate transition trajectory can cause the vehicle to climb or descend excessively while the lift-producing mechanism changes from rotor-supported flight toward wing-borne flight. Figure 3 compares the altitude response for all five cases. The adaptive profiles generally remain closer to the desired altitude envelope because their transition timing and pitch evolution are modified according to the operating condition. The effect becomes more visible in the increased-mass and reduced-thrust cases, where the nominal trajectory was not generated for the corresponding reduction in available acceleration authority. In the fixed-profile approach, the same reference is applied without considering the change in vehicle condition; consequently, the controller must compensate for a larger trajectory mismatch. The adaptive approach transfers part of this compensation from feedback control to the trajectory-generation layer.

Table 2 – Relative change in key performance indicators obtained with trajectory adaptation

	Altitude deviation	Pitch RMSE	Airspeed RMSE	Control effort
Nominal	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Mass +10%	-1835.5%	-103.3%	-1284.6%	-0.1%
Thrust -10%	-23.6%	-9.7%	-11.8%	-0.1%
Initial speed -20%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Disturbance	9.6%	-24.4%	-23.9%	-0.3%

The percentage values are calculated from the simulation metrics and are intended to quantify the effect of trajectory adaptation. Positive values indicate a reduction in the corresponding metric. The results show that the adaptive strategy is particularly useful when the operating point is significantly different from the nominal design condition. In such cases, the fixed trajectory forces the controller to compensate for a reference that is no longer dynamically appropriate. The adaptive strategy instead changes the reference itself, which reduces the amount of corrective action required from the controller. This distinction is important because simply

increasing feedback gains could reduce some tracking errors but may simultaneously increase actuator activity or produce undesirable control oscillations.

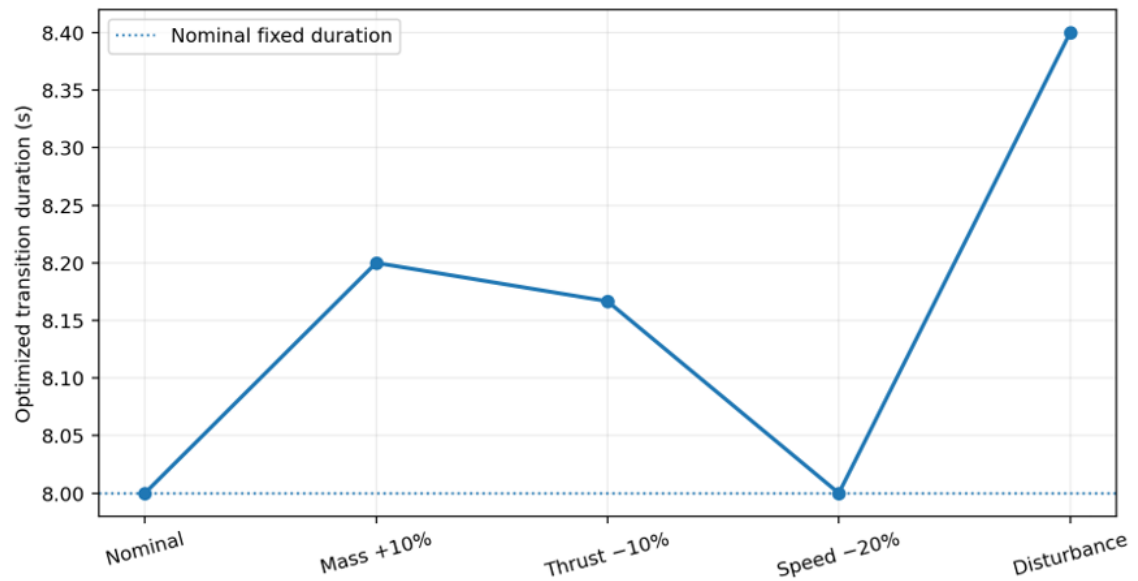


Figure 4 – Condition-dependent adaptation of transition duration.

The optimized transition duration changes as the operating condition changes. Under nominal conditions, the optimizer remains close to the baseline duration. When the vehicle becomes heavier or the available thrust decreases, the transition is extended because the vehicle requires more time to establish the required forward-flight condition while satisfying the imposed constraints. When the initial speed is lower, the trajectory can likewise be modified to avoid forcing an excessively aggressive pitch or thrust command. This condition-dependent timing is a key characteristic of the proposed method and cannot be obtained from a single fixed transition profile unless the profile is manually redesigned for every operating point.

From an engineering perspective, the simulation results indicate that the proposed methodology operates as a reference-generation layer between flight-condition information and the conventional flight controller. Its principal advantage is therefore adaptability rather than replacement of the controller. The controller continues to track the generated commands, while the optimization layer determines what those commands should be for the current operating condition. This architecture is attractive for VTOL systems because transition dynamics are strongly coupled and may vary with vehicle mass, propulsion authority, aerodynamic state, and disturbance conditions. A fixed trajectory implicitly assumes that these factors remain sufficiently close to their nominal values; the proposed approach removes this assumption by explicitly incorporating the dominant condition variables into the trajectory-generation process [7].

The results also clarify the scope of the proposed contribution. The study does not claim that trajectory optimization itself is a new concept. Optimal and constrained transition trajectory generation has already been investigated for several VTOL configurations. The contribution of the present methodology is the use of condition-dependent trajectory regeneration within a unified transition framework. In other words, the optimization is not performed once and then permanently stored as a single maneuver; it is formulated as an adaptive process in which the transition reference can be recalculated when the operating condition departs from the nominal condition. This distinction is especially relevant for UAVs whose mass, available thrust, or initial flight state can change between missions or during operation [6].

Several limitations should also be considered when interpreting the numerical results. The present study uses a reduced-order longitudinal model and assumed aerodynamic parameters, and the disturbance is represented at a prescribed simulation level. Consequently, the numerical values

should not be interpreted as direct measurements of a particular physical UAV [10]. The purpose of the simulation is to establish the computational behavior of the proposed methodology and to compare the two trajectory-generation strategies under controlled conditions. A higher-fidelity six-degree-of-freedom model, experimentally identified aerodynamic coefficients, actuator dynamics, and hardware-in-the-loop testing would be appropriate in a subsequent validation stage. Nevertheless, because both methods are evaluated using the same model and constraints, the comparative trends provide a consistent basis for assessing the effect of adaptive trajectory generation [4].

Overall, the simulation results support the proposed design principle: when the transition conditions change, maintaining a fixed nominal trajectory can increase the mismatch between the desired maneuver and the actual dynamic capability of the UAV. Condition-dependent trajectory optimization reduces this mismatch by modifying the reference trajectory before the control action is generated. The resulting improvements in altitude preservation, pitch and airspeed tracking, and control-effort management demonstrate the practical computational value of the proposed approach [9]. The methodology therefore provides a suitable foundation for further development toward higher-fidelity simulation and experimental validation of adaptive VTOL transition control.

Conclusion.

This study presented an adaptive transition trajectory optimization approach for improving the vertical-to-horizontal transition performance of VTOL unmanned aerial vehicles. Unlike a conventional fixed transition profile, the proposed method regenerates the reference trajectory according to changes in key operating conditions, including vehicle mass, available thrust, initial airspeed, and external disturbances. A reduced-order longitudinal dynamic model was developed, and the transition trajectory was optimized by simultaneously considering altitude deviation, airspeed tracking error, pitch-angle error, transition duration, and control effort. Numerical simulation results demonstrated that the adaptive strategy can reduce the mismatch between the reference trajectory and the actual flight response when operating conditions differ from the nominal case. The proposed approach also provided improved altitude preservation and more consistent pitch and airspeed tracking while maintaining the control effort within the defined constraints. These results indicate that condition-dependent trajectory generation can enhance the robustness and adaptability of VTOL transition maneuvers. Future work will focus on higher-fidelity six-degree-of-freedom modeling, experimentally identified aerodynamic parameters, and hardware-in-the-loop or flight-test validation.

References

1. Li, B., Sun, J., Zhou, W., Wen, C.Y., Low, K.H. & Chen, C.K. (2020). Transition Optimization for a VTOL Tail-Sitter UAV. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25(5), 2534-2545. DOI: 10.1109/TMECH.2020.2983255.
2. Panish, L. & Bacic, M. (2024). Tiltwing eVTOL Transition Trajectory Optimization. *Journal of Aircraft*. DOI: 10.2514/1.C037862.
3. Cong, K., Ma, D., Zhang, L., Xia, X. et al. (2024). Longitudinal dynamic envelope solution and transition path optimization based on reachability analysis for fixed-wing VTOL UAVs. *Aerospace Science and Technology*, 151, 109267. DOI: 10.1016/j.ast.2024.109267.
4. Yang, Y., Zhu, J., Yuan, X., Wang, X., Kuang, M. et al. (2024). Dynamic characteristics analysis and robust transition control of tail-sitter VTOL UAVs. *Aerospace Science and Technology*, 145, 108868. DOI: 10.1016/j.ast.2024.108868.
5. Doff-Sotta, M., Cannon, M.R. & Bacic, M. (2023). Robust trajectory optimisation for transitions of tiltwing VTOL aircraft. *2023 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, 425-431. DOI: 10.1109/CCTA54093.2023.10253282.

6. Han, Q., Liu, Z., Su, H. & Liu, X. (2024). Adaptive trajectory tracking control for VTOL UAVs with unknown time-varying mass using an extended I&I estimator. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 38(3), 1080-1097. DOI: 10.1002/acs.3746.
7. Bhardwaj, P. & Holzapfel, F. (2024). Unified Trajectory Control for Vertical Take-Off and Landing Transition Aircraft. *AIAA Aviation Forum and ASCEND 2024*. DOI: 10.2514/6.2024-4421.
8. Smeur, E.J.J., Bronz, M. & de Croon, G.C.H.E. (2020). Incremental Control and Guidance of Hybrid Aircraft Applied to a Tailsitter Unmanned Air Vehicle. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 43(2), 274–287. DOI: 10.2514/1.G004520.
9. Yang, Y., Yang, J., Wang, X. & Zhu, J. (2021). Robust Optimal Transition Maneuvers Control for Tail-Sitter Unmanned Aerial Vehicles. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 31(16), 8007–8029. DOI: 10.1002/rnc.5736.
10. Transition Characteristics for a Small Tail-Sitter Unmanned Aerial Vehicle. (2021). *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(10), 220–236. DOI: 10.1016/j.cja.2020.12.021.
11. Transition Control of a Tail-Sitter Unmanned Aerial Vehicle with L1 Neural Network Adaptive Control. (2023). *Chinese Journal of Aeronautics*, 36(7), 460–475. DOI: 10.1016/j.cja.2023.04.002.

АДАПТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ВЗЛЁТОМ И ПОСАДКОЙ

Аннотация. Переходный режим от вертикального к горизонтальному полёту является одним из наиболее сложных этапов эксплуатации беспилотных летательных аппаратов с вертикальным взлётом и посадкой вследствие существенного изменения аэродинамических сил, пространственного положения летательного аппарата, требований к силовой установке и эффективности системы управления. В настоящем исследовании предлагается адаптивный подход к оптимизации траектории переходного режима, направленный на повышение устойчивости, эффективности и управляемости процесса перехода. Разработана математическая модель беспилотного летательного аппарата, описывающая взаимосвязанные изменения воздушной скорости, угла тангажа, высоты полёта и управляющих воздействий в процессе переходного режима. Предлагаемый подход формирует траекторию переходного режима в соответствии с текущими условиями полёта, в отличие от использования фиксированной заранее заданной траектории. Целевая функция оптимизации сформирована с одновременным учётом отклонения высоты, ошибки отслеживания воздушной скорости, отклонения угла тангажа, продолжительности переходного режима и управляющего воздействия. Параметры траектории оптимизируются вычислительным методом при различных условиях эксплуатации, включая изменение начальной скорости, располагаемой тяги и воздействие внешних возмущений. Результаты моделирования используются для сравнения адаптивной траектории с традиционной фиксированной траекторией переходного режима. Полученные результаты демонстрируют потенциальную возможность применения адаптивной оптимизации траектории для снижения ошибок отслеживания, обеспечения более безопасных условий полёта и повышения эффективности переходного режима. Предлагаемая методология представляет собой вычислительный подход к проектированию эффективных стратегий переходного режима для беспилотных летательных аппаратов с вертикальным взлётом и посадкой.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат с вертикальным взлётом и посадкой, переходный режим полёта, адаптивная оптимизация траектории, управление полётом, планирование траектории, динамика полёта, численное моделирование, оптимизация управления.

ТІК ҰШЫП-ҚОНУ МҮМКІНДІГІ БАР ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫНЫҢ ӨТПЕЛІ РЕЖИМ ТРАЕКТОРИЯСЫН БЕЙІМДЕЛГЕН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аңдатпа. Тік ұшудан көлденең ұшуға өтпелі режим тік ұшып-қону мүмкіндігі бар ұшқышсыз ұшу аппараттарын пайдалану кезіндегі ең күрделі кезеңдердің бірі болып табылады, өйткені осы кезеңде аэродинамикалық күштер, ұшу аппаратының кеңістіктегі қалпы, күштік қондырғыға қойылатын талаптар және басқару жүйесінің тиімділігі айтарлықтай өзгереді. Осы зерттеуде өтпелі процестің орнықтылығын, тиімділігін және басқарылуын арттыруға бағытталған өтпелі режим траекториясын оңтайландырудың бейімделмелі тәсілі ұсынылады. Өтпелі режим кезінде әуе жылдамдығының, тангаж бұрышының, ұшу биіктігінің және басқару әсерлерінің өзара байланысты өзгерістерін сипаттайтын ұшқышсыз ұшу аппаратының математикалық моделі әзірленді. Ұсынылып отырған тәсіл алдын ала белгіленген тұрақты траекторияны пайдаланудың орнына, ағымдағы ұшу жағдайларына сәйкес өтпелі режим траекториясын қалыптастырады. Оңтайландырудың мақсаттық функциясы биіктік ауытқуын, әуе жылдамдығын қадағалау қатесін, тангаж бұрышының ауытқуын, өтпелі режимнің ұзақтығын және басқару әсерін бір мезгілде ескере отырып қалыптастырылды. Траектория параметрлері бастапқы жылдамдықтың, қолжетімді тарту күшінің өзгеруі және сыртқы әсерлер жағдайындағы әртүрлі пайдалану режимдері үшін есептеу әдістері негізінде оңтайландырылды. Модельдеу нәтижелері бейімделмелі траекторияны өтпелі режимнің дәстүрлі тұрақты траекториясымен салыстыру үшін пайдаланылды. Алынған нәтижелер траекторияны бейімделмелі оңтайландыруды қолдану қадағалау қателерін азайтуға, қауіпсіз ұшу жағдайларын қамтамасыз етуге және өтпелі режимнің тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Ұсынылған әдістеме тік ұшып-қону мүмкіндігі бар ұшқышсыз ұшу аппараттары үшін тиімді өтпелі режим стратегияларын әзірлеуге арналған есептік тәсілді ұсынады.

Түйін сөздер: Тік ұшып-қону мүмкіндігі бар ұшқышсыз ұшу аппараты, өтпелі ұшу режимі, траекторияны бейімделмелі оңтайландыру, ұшуды басқару, траекторияны жоспарлау, ұшу динамикасы, сандық модельдеу, басқаруды оңтайландыру.

Сведение об авторах

Исгандаров Ислам	Профессор, заведующий кафедрой аэрокосмических приборов, Национальная академия авиации, Баку, Азербайджан. E-mail: iisgandarov@naa.edu.az
Гаджизаде Мухаммадали	Аспирант, Национальная академия авиации, Баку, Азербайджан. E-mail: muhammadali.hajizadeh@naa.edu.az

Авторлар туралы мәлімет

Исгандаров Ислам	Профессор, аэроғарыштық аспаптар кафедрасының меңгерушісі, Ұлттық авиация академиясы, Баку, Әзірбайжан. E-mail: iisgandarov@naa.edu.az
Хажизада Мухаммадали	Докторант, Ұлттық авиация академиясы, Баку, Әзірбайжан. E-mail: muhammadali.hajizadeh@naa.edu.az

Information about the authors

Isgandarov Islam	Professor, Head of the Aerospace Equipment department, National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan, E-mail: iisgandarov@naa.edu.az
Hajizada Muhammadali	PhD Student, National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan, E-mail: muhammadali.hajizadeh@naa.edu.az



ӘУЕ КӨЛІГІ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВОЗДУШНЫЙ ТРАНСПОРТ И ТЕХНОЛОГИИ AIR TRANSPORT AND TECHNOLOGY

УДК 629.73

МРНТИ 50.43.19

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_2

Б. Муратхан¹, К.Т. Кошеков¹, Т.Б. Керибаева^{1*}

¹АО «Академия Гражданской Авиации», Алматы, Казахстан

*E-mail: talshyn.keribayeva@agakaz.kz

КИБЕР-МОДЕЛЬ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ АЭРОМОБИЛЬНОСТИ

Аннотация. В статье предлагается концептуальная модель интегрированной системы энергообеспечения системы городской воздушной мобильности. Цель статьи состоит в повышении робастности системы городской воздушной мобильности. Агенты энергетической инфраструктуры UAM включают: летательные аппараты eVTOL; вертипорты, оснащенные мощными зарядными станциями; высокоскоростные зарядные системы; системы накопления энергии; возобновляемые источники энергии. Ключевыми аспектами цифровой трансформации региональной возобновляемой энергетики для UAM являются: умные сети (Smart Grids): искусственный интеллект; интернет вещей; инфраструктура зарядки. Энергетические системы вертипортов интегрируются с городскими электросетями и экономикой малых высот. Развитие городской инфраструктуры интегрирует систему воздушной мобильности в общую концепцию электроэнергетики, включая мониторинг инфраструктуры, как указано в планах развития гражданской беспилотной авиации Казахстана на 2025–2031 гг. В качестве методологии предметных исследований ресурсов региональной возобновляемой энергетики в городской воздушной мобильности использован геосистемный подход. В окончательном концептуальном варианте решение поставленных задач рассматривается как территориально - интегрированная векторная 2-D система: вертикальный вектор – геосистема, и горизонтальный вектор – электроэнергетика. Решаемые задачи относятся к кибер-системному моделированию, где оперируют вероятностными, имитационными, агентными, экспертными формальными форсайт инструментами. Инструментарий форсайт моделирования в статье был использован с целью оценки ранговых приоритетов в интегрированной системе развития электроэнергетики. Ранги значимости были найдены для следующих направлений развития энергетики: исследованы: оценки были исследованы: угольная электроэнергетика; большая атомная электроэнергетика; большая гидро – электроэнергетика; малая гидро – электроэнергетика; ветро – электроэнергетика; солнечная – электроэнергетика; теплонасосы; малая атомная электро-энергетика; интегрированная ВИЭ; водородная электро – энергетика. Наибольшее предпочтение было отдано малой атомной энергетике, а второй приоритет отдан малой гидроэнергетике. Эти результаты тесно связаны с природно-климатическими, социально-экономическими и территориально-географическими особенностями региона.

Ключевые слова: система, энергетика, кибертехнология, риск, математическое обеспечение, техническое обеспечение, имитационные модели.

Введение.

Наступающая урбанизация в условиях цифровой трансформации экономики представляется кибер-средой, в которой важнейшее место отводится системе воздушной мобильности, агрегирующую гражданскую авиацию и беспилотные летательные системы [1,2]. В социально-технологическом конгломерате происходит качественная революция с внедрением летательных аппаратов класса eVTOL. Беспилотные аппараты eVTOL (Electric Vertical Takeoff and Landing) - «это электрические летательные аппараты с вертикальным взлетом и посадкой, предназначенные для городской аэромобильности (UAM), пассажирских перевозок и доставки грузов» [3]. Цель работы состоит в повышении робастности системы энергообеспечения в среде городской воздушной мобильности.

Обзорный анализ проблемы городской аэромобильности приведен в работе А.Сюй [4], в которой указывается, что в условиях ускоренной урбанизации, роста населения и серьезных пробок на дорогах традиционные виды транспорта уже не обеспечивают эффективного передвижения по городу. В этом контексте UAM стала наиболее перспективной транспортной социально-экономической системой, которая стала одним из вариантов выхода из создавшейся ситуации. В отчете НАСА отмечается, что городская воздушная мобильность является наиболее безопасным и эффективным видом логистического решения, использующего как пилотируемые, так и беспилотные летательные системы в городских районах [5]. UAM охватывает различные области применения, включая услуги воздушного такси, экстренную медицинскую транспортировку, доставку грузов и персонала в критически важные места, и городскую экспресс-доставку, обеспечивающую эффективное распределение товаров.

Литературный анализ показал, что современные известные инженерные чисто конструктивно – технологические решения в большинстве своем обеспечивают запас полета от 50 до 100 км, что существенно ограничивает социально-экономические потребности урбанизированных территорий. Особенно значимо в указанных технологиях проявил себя энергетический риск. Для дронов eVTOL в основном используется пропеллерный электропривод, поэтому управление энергией является «неизбежными техническими вызовами» [6]. Исходя из указанных предпосылок, в работах [7,8] предлагается модель оптимизации энергосистемы с учетом скорости разряда литий-ионного аккумулятора и снижения напряжения во время полета. Было установлено, что, оптимизируя распределение энергии, можно продлить время полёта, что имеет крайне важные последствия. Несмотря на то, что энергетическая безопасность является одним из ключевых процессов в системе управления полетами, в документе «4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации 2010» этому фактору отводится крайне незначительное место. Практика показывает, что к основным проблемам литиевых аккумуляторов относятся: быстрая разрядка после зарядки, вздутие батареи, внезапное отключение во время полета, значительное сокращение времени полета и несовместимость зарядных устройств. Оценка аккумуляторов БПЛА базируется на трех ключевых факторах: емкости, токоотдаче, весе. Энергоемкость - способность отдавать высокие токи (20C–75C+ для FPV) и сохранение работоспособности при заданном температурном режиме. Основными критериями оценивания аккумуляторов беспилотных авиационных систем (БАС) являются: емкость (мАч/mAh), которую определяют по тому, как долго дрон может находиться в воздухе; вес аккумулятора; токоотдача, показывающая скорость отдачи энергии без перегрева; удельная энергоемкость (Вт·ч/кг; сбалансированность напряжения на всех банках (4.2V на ячейку при полном заряде). Техническая диагностика аккумуляторов состоит в измерении внутреннего сопротивления, которое измеряется интеллектуальными зарядными устройствами. Высокое сопротивление свидетельствует о старении и потере мощности. Оценка ресурса. Так, литий-полимерные аккумуляторы выдерживают 300–500 циклов заряда/разряда до деградации мощности. В работах [9 - 12] отмечалось, что необходимость компромиссов между

производительностью и безопасностью архитектуры энергосистемы в электрических летательных аппаратах приобретает исключительно важное значение. По этой причине время полёта eVTOL сильно зависит от конструктивных компромиссов между полезной ёмкостью аккумулятора, резервной энергией для безопасности и массой батареи, и должна проводиться количественная оценка рисков, с целью обеспечения дальности полёта. Она является ключевым технологическим и логистическим агентом экономики малых горизонтов городского воздушного транспорта, который развивается в Казахстане, где тестирование первых аэротакси запланировано на 2026 - 2027 годы. В Казахстане развитие UAM и сопутствующей энерго-инфраструктуры рассматривается как часть модернизации электроснабжения и повышения транспортной доступности в мегаполисах. Из этого вытекает, что организационно-технологическое обеспечение UAM имеет следующее системное содержание: зарядная инфраструктура энергосистемы включающая в себя сеть быстрых зарядных станций, размещенных на вертикапортах (вертодромах для eVTOL), обеспечивающих быструю заправку летательных аппаратов между рейсами; из-за высокой потребности в энергии ограниченной емкостью источников требуется высокая мощность для зарядки в сжатые сроки, что создает нагрузку на городские электросети; интеграция энергосистемы UAM с городскими сетями предусматривается высокий уровень использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ); мониторинг надежности работы энергосистемы опирается на предиктивность робастности системы.

На основании изложенного следует вывод об актуальности, представленной проблематики как в целом, так и в локальных научно-практических приложениях. Для достижения цели исследования в декларируемой предметной области необходимо решить следующие задачи: форсайт моделирование системной интеграции энергообеспечения региональной системы аэромобильности; формализация процессов интегрирования региональной электрогенерации на возобновляемых технологиях.

Материалы и методы исследования.

Методология и методы исследования в предлагаемой статье базируется на следующих подходах и стандартах: системно-интегрированном подходе; платформе Индустрия 4.0; стандарте ISO 31000. Предметом исследования является процесс повышения энергетической надежности беспилотной системой городской воздушной мобильности на примере летательных аппаратов класса eVTOL, в среде угроз природного, антропогенного и субъективного происхождения. Беспилотная система в среде современной урбанизированной территории представляют собой по классификации Стаффорда Бира С. «сверхсложную» систему [13,14]. В работе выдвинуты ряд гипотез: исследуемая система относится к недетерминированным; в контуре управления присутствует человек; система относится к открытым, так как существуют связи с внешней средой, которая оказывают на систему воздействие, и система на них реагирует.

Моделирование сверхсложных системных процессов региональной интегрированной электроэнергетике приводит к необходимости оперировать большой совокупностью таких ключевых атрибутов и понятий как: система, системная открытость, системная динамика, горизонтальная и вертикальная интегрированность, синергетика, многокритериальность, процессность, недетерминированность, нестационарность, нелинейность, адаптивность, качество, проектность, инновационность, риски, индивидуализация. Бизнес-среда и бизнес-процессы в предметном контексте исследования опираются на Государственную и региональную программы Цифровой трансформации.

Результат и их обсуждение.

Текущий этап исследований состоит в формализации предметной области. Учитывая геосистемные особенности предметной социально-экономической территории, промышленный и социальный потенциалы на первом этапе формализации задачи

исследования использовано форсайт-структурное моделирование [15]. В качестве территориального примера была выбрана Восточно-Казахстанская область, которая со всех точек зрения, обладает в среде Республики Казахстан самым большим разнообразием и адекватно отвечает условиям задачи моделирования. Научно-практическая методология геосистемности задачи опирается на парадигму объективности существования единой связи «природа-общество», интегрирующей совокупность взаимосвязанных и объединенных единой целью функционально самостоятельных макро-агентов. В качестве экспертов были привлечены специалисты областной администрации, а также ученые Алматинской Академии гражданской авиации. Оптимальное количество экспертов с учетом условий исследуемого региона составило шесть специалистов. Экспертам было предложено ранжировать по 10-ти балльной шкале 6 вариантов развития региональной энергосистемы. На экспертизу были вынесены следующие энерго-варианты:

1. Угольная электроэнергетика – В1.
2. Большая атомная электроэнергетика – В2.
3. Большая гидро – электроэнергетика – В3.
4. Малая гидро - электроэнергетика – В4.
5. Ветро - электроэнергетика – В5.
6. Солнечная - электроэнергетика. – В6.
7. Теплонасосы - В7;
8. Малая атомная электро-энергетика – В8;
9. Интегрированная ВИЭ – В9;
10. Водородная электро – энергетика – В10.

В последнее время большую популярность и практическое развитие, особенно в частном домостроении, приобретают «Тепловые насосы». Данная технология в настоящее время используется в основном в обогреве частных домостроений. Экспертный опрос может проводиться путем: открытой дискуссии, мозгового штурма и анонимного анкетирования. В данном случае было использовано анонимное анкетирование. Каждому эксперту предлагались две анкеты. В первой анкете ставилась задача и форма оценивания вариантов экспертизы. Вторая анкета содержала предложение, по взаимной оценке, компетентности экспертов по десяти - балльной системе. После сбора результатов анкетирования была проведена их обработка по известной методике. Итоговые результаты экспертизы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Итоговые балльные взвешенные оценки экспертного исследования весомости инвестиционных проектов развития региональной энергосистемы

№ Эксперта	Варианты экспертизы									
	В1	В2	В3	В4	В5	В6	В7	В8	В9	В10
Э1	0,105	0,132	0,112	0,099	0,125	0,118	0,092	0,086	0,072	0,059
Э2	0,105	0,133	0,070	0,077	0,126	0,119	0,056	0,140	0,091	0,084
Э3	0,091	0,110	0,104	0,123	0,084	0,097	0,130	0,117	0,078	0,065
Э4	0,069	0,103	0,097	0,124	0,131	0,062	0,076	0,138	0,110	0,076
Э5	0,028	0,095	0,074	0,081	0,135	0,108	0,188	0,122	0,115	0,059

На основании данных таблицы 1 формируется таблица рангов по максимальному баллу, которому присваивается единица и т.д. (табл. 2)

Таблица 2 – Ранговые оценки экспертизы проектов развития региональной энергосистемы

№ эксперта	Ранговые оценки результатов экспертизы										Сумма рангов
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	
Э1	5	1	4	6	2	3	7	8	9	10	55
Э2	5	2	9	8	3	4	10	1	6	7	55
Э3	7	4	5	2	8	6	1	3	9	10	55
Э4	9	5	6	7	3	2	10	8	1	4	55
Э5	9	6	7	2	8	2	5	1	3	4	55

Качество экспертизы оценивается степенью совпадения мнений экспертов, для этой цели используются ранговые коэффициенты корреляции Спирмена. Результат экспертизы оказался следующим: наибольшее предпочтение эксперты отдают малой атомной энергетике – В8, а второй ранг присваивается малой гидроэнергетике – В4. Так как климатические условия РК очень разнообразны, то для южных географических регионов, где сохраняются большие проблемы с водными ресурсами, результаты экспертизы должны быть совершенно другие.

В следующей задаче предметом интереса является новая парадигма электро-генерации, которая рассматривается как интегрированная кибер-система, содержащая некоторую совокупность программно-стохастических агентов, объединенных в единую региональную кибер-среду, функционально представляющую синергетическую сущность. Гипотетическая кибер-модель подобной энергосистемы может быть представлена рисунком 1, состоящей из энергопроизводителей в составе генерирующих агентов Э₁-Э₇ и порядка 35 наиболее крупных потребителей электроэнергии П₁-П₃₅.

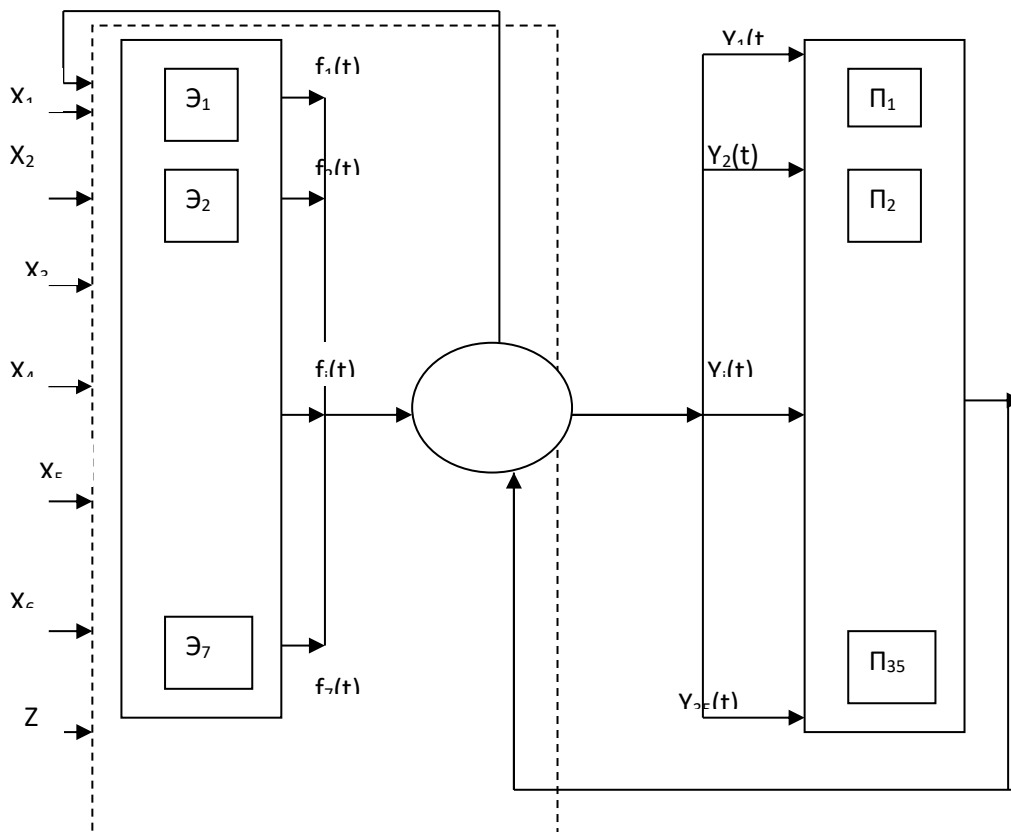


Рисунок 1 – Кибер - модель интегрированной региональной энергосистемы

В модели не рассматриваются варианты В1, В7, В10. Входами системы является множество $\{X_i\}$ в том числе X_1 - финансы, X_2 - материальные ресурсы, X_3 - людские ресурсы, X_4 - экология. Аналогичный подход для построения кибермодели предприятия использован в работах Дж. Форрестера и Д. Медоуза. Однако важными факторами, существенно влияющими на функционирование системы являются эксплуатационная надежность технического обеспечения и внешние случайные факторы Z в виде климатических, экономических и др. воздействий.

Под влиянием всего комплекса внешних и внутренних факторов, генерируемая мощность будет представлять случайный процесс $f_i(t)$. Суммарная энергия системы ОЭСР распределяется между потребителями Π_1 - Π_{35} . Для оперативного управления энерго-распределением между потребителями создан специальный информационно-диспетчерский центр (ИДЦ), который выполняет диспетчерские функции и функции оперативного нормирования в случае нехватки энергоресурсов генерируемых в системе используется электроэнергия из внерегиональных источников (X_6).

Особенность работы ИДЦУ в современных рыночных условиях, когда энергогенерирующие предприятия принадлежат разным владельцам, коренным образом изменяет ее функции. Раньше за диспетчерской службой были закреплены только функции договорной коммутации. В настоящее время в условиях вариаций себестоимости производства электроэнергии у разных производителей и закрепления взаимоотношений поставщика и потребителя электроэнергии договорными условиями (ДУ), в которых присутствуют штрафные санкции при недопоставках в договорное время электроэнергии потребителю. Данная служба создана для того, чтобы в первую очередь отслеживать коллективные интересы производителей электроэнергии.

Основная функция ДУ может быть выражена целевой функцией

$$L(x) = \sum C_i X_i \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где C_i - стоимость штрафа i -му производителю за квт/час недопоставляемого топлива;

X_i - объем недопоставленного топлива i -м производителем.

В данной модели представляется крайне важным исследовать вероятности критических ситуаций в системе генерирования электроэнергии и вероятностная реакция потребителя. Не менее важным обстоятельством для потребителя является прогнозирование возможности стать не потребителем, а производителем электроэнергии при внедрении «зеленой» энергетики. Алгоритм имитационной модели следующий.

Общий принцип работы кибер - системы.

Управления энергосистемой может управляться в двух режимах: ручном и программно- автоматическом. В связи с высоким уровнем развития ИИ, на некоторых этапах управления можно применять данную технологию, но под контролем оператора.

В каждый временной промежуток управления (допустим ежечасно), диспетчер - система "опрашивает" потребность по каждому потребителю и ранжирует их по степени определенной приоритетности. Вторым этапом "опрашиваются" производители и тоже ранжируются по стоимости и их энергетическим возможностям. Удовлетворение потребителей начинается с верхнего приоритета долевой энергией и т.д.

1.Ценовые заявки производителей электрической энергии:

1.1 Каждый день не позднее 8-30 час. установленного времени, каждый производитель электрической энергии должен подавать набор заявленных цен (на 1 этапе она одна) и декларацию, касающуюся рабочей мощности каждого блока на следующие сутки.

1.2. Каждый день, не позднее 8-30 час. установленного времени, поставщик электрической энергии и потребители должны подавать в систему прогноз потребления мощности Мвт., а также прогноз суточного потребления электроэнергии Мвтч.

2. Повторные заявки на рабочую мощность:

2.1 В любое время производитель электрической энергии может подать пересмотренную заявку рабочей мощности относительно электростанций, рабочая мощность которых изменилась с момента подачи последней заявки;

2.2 Повторная заявка рабочей мощности должна включать блок, которого касается заявка, расчетные периоды к которым относится повторная заявка, пересмотренную рабочую мощность;

2.3 производитель электрической энергии должен обеспечить, чтобы все поданные заявки отвечали фактическому состоянию оборудования и запасам топлива на его электростанции.

3. Прогноз электропотребления:

3.1 Поданные заявки по мощности и энергии всеми поставщиками и потребителями электрической энергии;

3.2 Все другие факторы, которые распорядитель системы финансовых расчетов обоснованно считает влияющими на потребление.

4. Прогноз высших перетоков.

На основании межрегиональных контактов распорядитель финансовых расчетов должен согласовать с диспетчерским центром прогноз данных перетоков для каждого расчетного периода следующих суток. Должен иметь форму сальдо внешних перетоков (экспорт минус импорт).

5. Сбор и проверка данных:

5.1 Распорядитель системы финансовых расчетов должен собрать данные измерений, проверить их достоверность, установить постоянные поправки.

5.2 Для каждого расчетного периода расчетных суток распорядитель системы финансовых расчетов должен вычислить с целью использования в расчетном графике следующие параметры.

5.3 Фактическую выработку электростанции.

5.4 Фактический отпуск электростанции.

-фактическое потребление поставщика (потребителя) электроэнергии;

5.5 Полное почасовое расчетное покрытие.

5.6 Фактический внешний переток.

Все данные должны быть распределены по расчетным периодам для включения их в систему финансовых расчетов.

6. Потери в магистральных и межгосударственных электросетях.

Для каждого расчетного периода расчетных суток распорядитель системы финансовых расчетов должен вычислить потери в электросетях.

7. Диспетчерское управление:

7.1 Диспетчерское управление должно осуществлять физическое управление всеми электростанциями в полном соответствии с правилами пула и действующими техническими нормами и правилами.

7.2 Диспетчерское управление должно подавать распорядителю системы финансовых расчетов диспетчерский журнал, в котором фиксируются все команды, подаваемые блоками в течение суток.

7.3 Диспетчерское управление должно вести учет всех команд, подаваемых по блокам, которые включают заданную диспетчером нагрузку каждому блоку. Данные этого учета передаются распорядителю системы финансовых расчетов;

7.4 Правила не дают никакой гарантии производителю электрической энергии относительно включения его в график нагрузки в случае подачи им завышенной ценовой заявки.

Для оптимального функционирования энергетической системы должен соблюдаться баланс между производством электроэнергии и ее потреблением. Для того, чтобы описать

систему, работающую без вмешательства человека в ее функционирование, представляется необходимым разработать имитационную модель, симулирующая производство и распределение электроэнергии. Но при составлении модели необходимо учесть, что производство энергии зависит от большого числа внешних факторов, независящих от персонала и производство электроэнергии носит заметный сезонный характер. Для оптимального функционирования энергосистемы выработка электроэнергии не должна снижаться ниже уровня X_H . Значения средней выработки в реальном масштабе времени может быть выражено функцией времени $X_{CP}=f(t)$ и в каждый моделируемый момент времени пересчитывается. Данные для вычисления средней мощности будут найдены экспериментально по отчетности энергогенерирующих системных агентов. Данные по потреблению электроэнергии находятся в базе данных системы энергосистемы.

Имитационная модель периодически с временным шагом "разыгрывает" ситуацию, которая может случиться на уровнях энергопроизводства и потребления. Если объем производимой электроэнергии достаточен для покрытия заявок потребителей, то электроэнергия распределяется по установленной договорной схеме: фиксируется количество электроэнергии, которое будет произведено каждой генерирующей установкой; на основании поданных потребителями заявок на поставку электроэнергии определяется точное количество энергии необходимое для потребления каждому потребителю; определяется стоимость произведенной электроэнергии; устанавливается отпускная цена; производятся взаиморасчеты.

Если в системе сложилась ситуация, что предложение на поставку электроэнергии не покрывает заявки потребителей, то работа энергосистемы будет идти по следующей схеме: оценивается объем производимой энергии по каждому производителю; определяется точное количество электроэнергии необходимое каждому потребителю; изыскиваются резервы внутри системы, для полного покрытия потребления. Если их недостаточно, то изыскивается возможность закупки энергии за пределами системы. При отсутствии таковой, в качестве крайней меры, производится сброс потребительской нагрузки; оценивается себестоимость энергии; определяется отпускная цена; анализируется причина сложившейся ситуации. Если дефицит электроэнергии образовался по вине ее производителя, то к нему применяются штрафные санкции; производятся взаиморасчеты между энергосистемой и его субъектами с учетом штрафа

Объем производства и потребления электрической энергии в значительной степени зависит от сезонов года и климатических условий, а также социально-экономических условий для данного периода. Для прогнозирования надежности системы энергоснабжения региона надо экспериментально-статистически исследовать эту зависимость.

Алгоритм имитационного исследования можно разделить на три основные этапа (рис. 2): установление экономико-математической зависимости между производством и потреблением электроэнергии с одной стороны и временем года с другой; моделирование производства и потребления электроэнергии во времени; проверка полученной модели на адекватность производственному процессу.

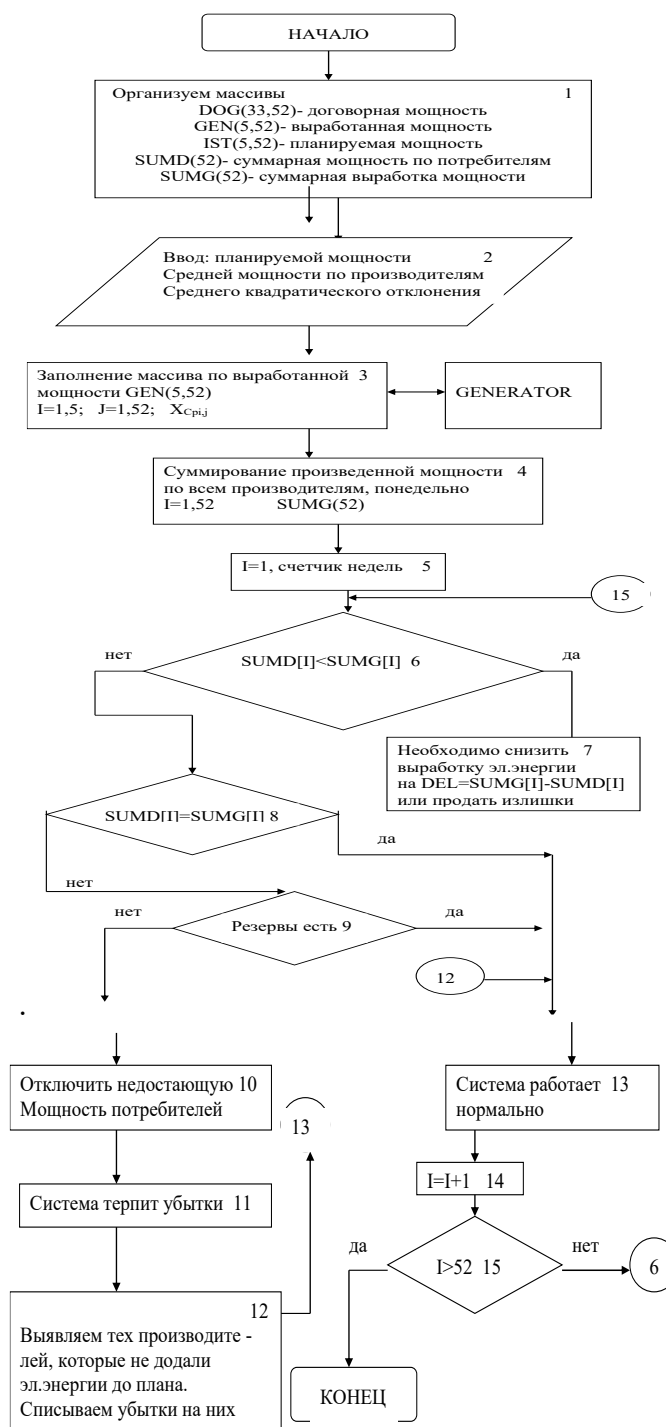


Рисунок 2 – Имитационный алгоритм энергобаланса территориальной электроэнергетической системы

Зависимость выработки и потребления от сезона весьма сложна, так как на динамику этих процессов влияет большое количество посторонних факторов (климатические условия, тенденции в развитии производства, нестабильности экономики, энергетическая обстановка в других регионах, состояние оборудования генерирующих станций, аварийные ситуации и др.). в результате этого формула, выражающая взаимосвязь между количеством произведенной и потребленной электроэнергии и временем года будет носить приближенный характер. Данная модель в общей системе территориальной

электроэнергетики выполняет функцию предиктивного мониторинга, который используя раздел регрессионного анализа в режиме реального времени, оперируя с историческими и текущими данными, строит спредсказательную модель. Предварительный функционально-статистический анализ территориальных энергосистемных процессов дает возможность выдвинуть гипотезу, что в основе этих зависимостей лежит полиномиальная зависимость, которая выражается следующей формулой

$$F(t)=a_0+a_1t+a_2t^2+\dots+a_nt^n \quad (2)$$

Используя пакет Statistica**, в разделе корреляционно-регрессионного анализа, были найдены численные значения коэффициентов выражения (2) Информационной базой анализа послужили статистические данные администрации региона за последние пять лет. В результате обработки регрессионные модели производства и потребления имеют следующий вид:

Для производства

$$Y=606,7+171,6x-55,4x^2+5,57x^3-0,169x^4 \quad (3)$$

Для потребления

$$Y=1132-172x+12,33x^2 \quad (4)$$

Результаты экспериментально-статистического регрессионного моделирования в графической форме приведены на рисунках 3 - 6.

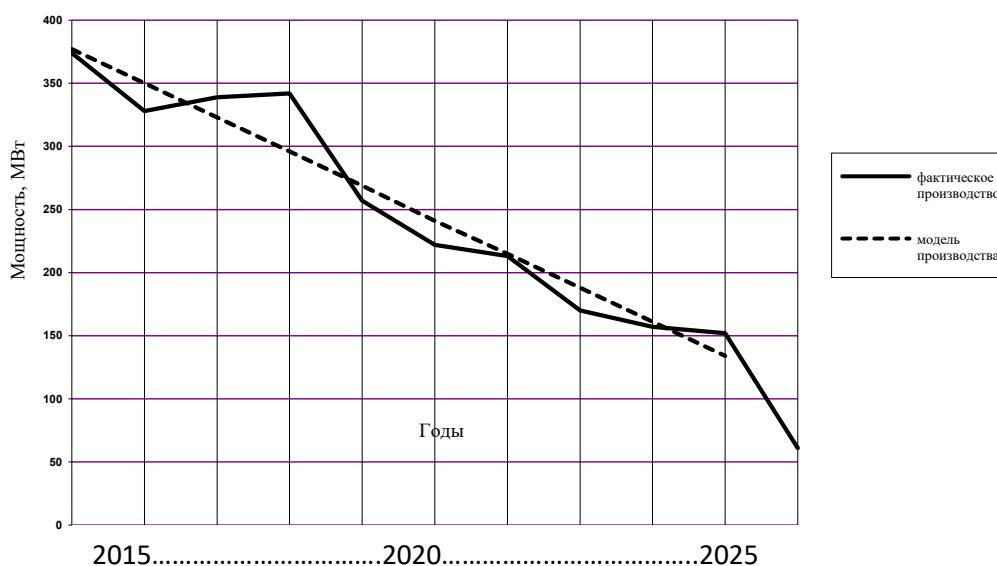


Рисунок 3 – Динамика производства электроэнергии

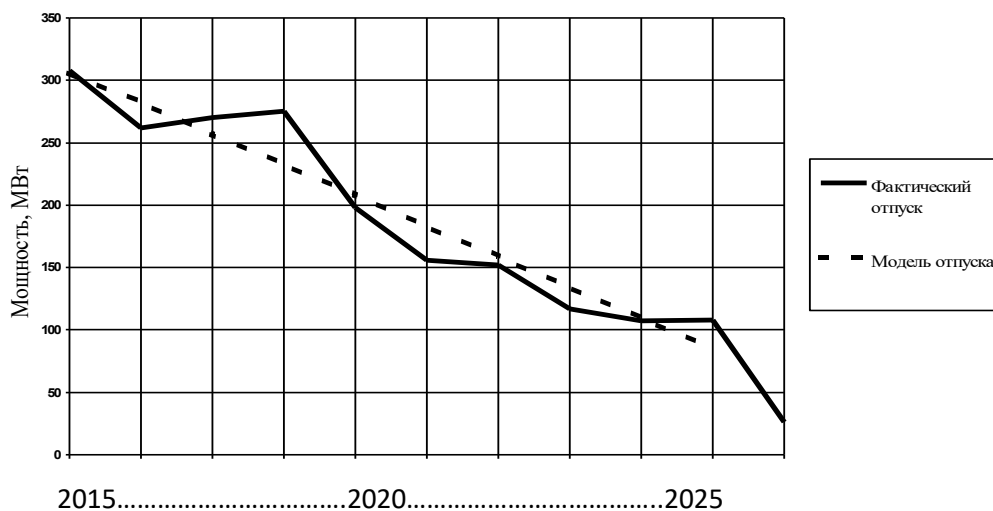


Рисунок 4 – Динамика отпуска электроэнергии

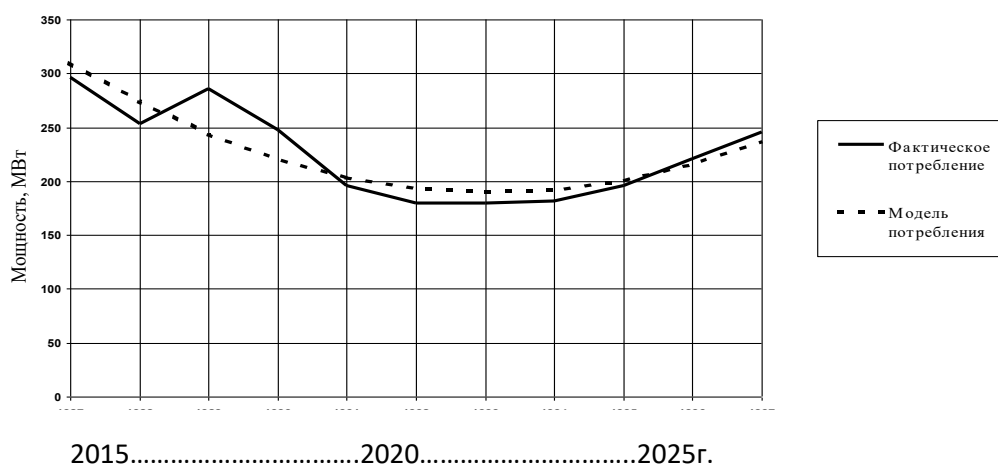


Рисунок 5 – Динамика потребления электроэнергии

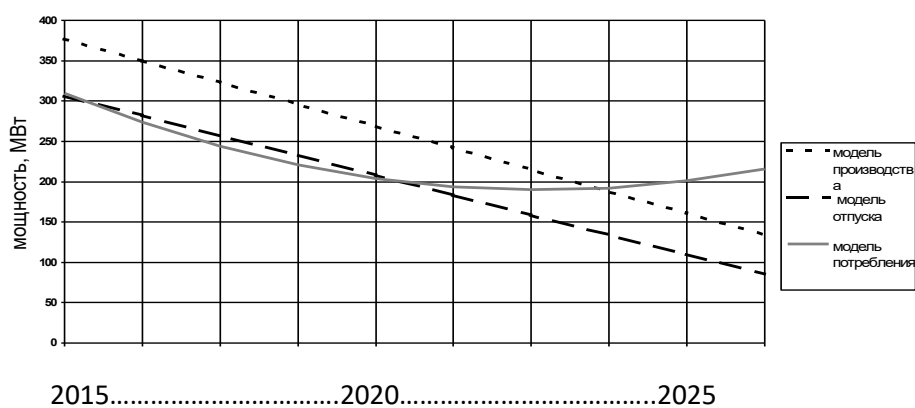


Рисунок 6 – Модели производства, отпуска и потребления электроэнергии

Адекватность моделей производственному процессу определяем с помощью оценки следующих показателей:

-корреляционное отношение - Q . При $Q > 0,8$ существует высокая корреляционная зависимость:

-для производства $Q=0,83$;

-для потребления $Q=0,94$;

Коэффициент детерминации D - характеризует взаимосвязь выбранных факторов и аргументов, $0 < D < 1$. Чем выше коэффициент детерминации, тем существеннее связь:

-для производства $D=0,7$;

-для потребления $D=0,9$;

Коэффициент Фишера F - характеризует соответствие модели производственному процессу $F_{\text{расч.}} > F_{\text{табл.}}$. Чем больше расчетное значение коэффициента превышает табличное, тем эффективнее уравнение регрессии:

-для производства $F_{\text{расч.}} = 4$ $F_{\text{табл.}} = 3,65$;

-для потребления $F_{\text{расч.}} = 9$ $F_{\text{табл.}} = 3,35$.

Таким образом, анализ вышеперечисленных показателей дает основание утверждать об адекватности полученных экономико - математических моделей, отражающих сезонные колебания производства и потребления электроэнергии.

Сопоставляя полученные модели (рис.3 – 6), можно сделать следующие выводы. В период с ноября по март в энергосистеме наблюдается превышение потребления электроэнергии над ее производством. Поэтому, зная это, необходимо заранее к этому периоду выискивать дополнительные резервы мощности внутри системы, заключать договора на поставку электроэнергии с энергопроизводителями других регионов, повышать эффективность и надежность использования оборудования.

Компьютерный эксперимент на базе данной программы и сведений о затратах, необходимых для расчета отпускной цены, (взяты из базы данных энергосистемы) представил прогнозную оценку себестоимости и отпускную цену на 2026-2027 годы. Результаты расчета следующие:

Статьи расходов	Сумма, тыс.тенге
1. Затраты на топливо	: 29576.00
2. Услуги производственного характера	: 20792.00
3. Вспомогательные материалы	: 6515.00
4. Фонд оплаты труда	: 10342.00
5. Амортизационные отчисления	: 4818.00
6. Прочие затраты	: 9723.00
7. Выработанная электроэнергия, (МВт/ч)	: 100.94
8. Фактический отпуск электроэнергии, (МВт/ч)	: 58.01
9. Потребление составит, (МВт/ч)	: 286.46
Себестоимость 1кВт/ч электроэнергии	: 1.16 тенге
Отпускная цена 1кВт/ч электроэнергии	: 1.53 тенге

Прогноз основных технико-экономических показателей деятельности энергосистемы до 2028 года.

ГОД	ВЫРАБОТКА	ОТПУСК	ПОТРЕБЛЕНИЕ	
2026	100.94		58.01	286.46
2027	73.90		33.45	320.57
2028	46.86		8.89	361.04
2029	19.82		-15.67	407.87
2002	-7.22		-40.23	461.06
2030	-44.07		-74.60	510.80
2031	-120.17		-148.22	527.65
2032	-147.21		-172.78	599.92

По результатам компьютерного эксперимента построены прогнозы производства и потребления электроэнергии (рис.7).

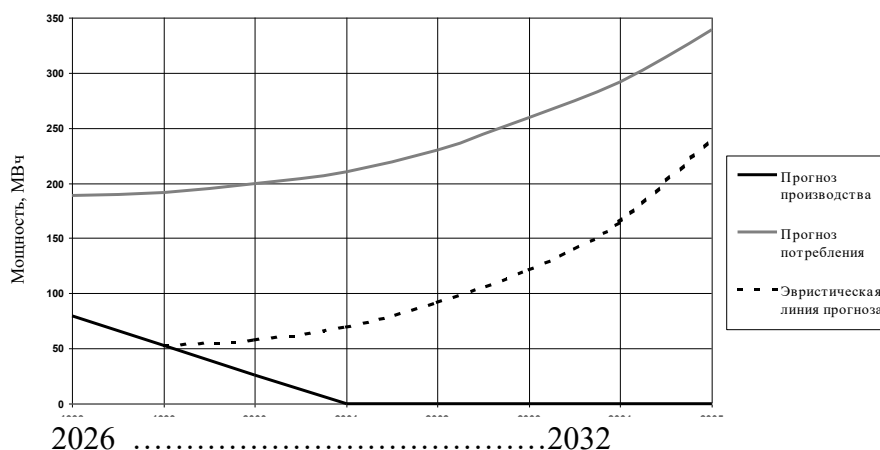


Рисунок 7 – Прогноз производства и потребления электроэнергии

В результате прогноза выявлено, что объем потребления электроэнергии будет постепенно расти. Производство электроэнергии будет продолжать падать и в 2029 году упадет до нуля. Но такая ситуация практически невозможна, так как чревата серьезными последствиями для региона. Поэтому в настоящее время руководством предприятия разрабатываются мероприятия по устранению причин, приведших к снижению выработки электрической энергии.

В связи с этим можно предположить, что в результате принятия инвестиционных мер производство электроэнергии в будущем будет увеличиваться и постепенно покроет объем потребления (рис.7). Таким образом, дефицит электроэнергии, должен гипотетически уменьшаться (рис.8).

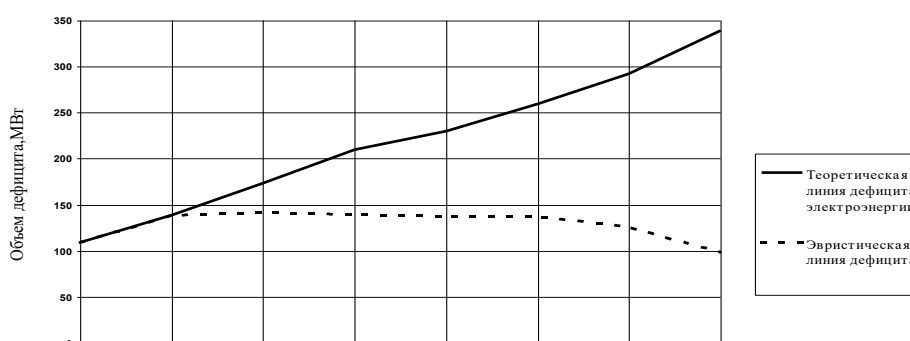


Рисунок 8 – Гипотетическая модель прогноза дефицита электроэнергии

Таким образом, из приведенных исследований можно сделать следующие выводы. В регионе исследования наблюдается дефицит электроэнергии, что считается временным явлением. Для удовлетворения растущего спроса на электроэнергию со стороны новых потребителей стремительно растущей среды региональной беспилотной мобильности и дата-центров - на данной территории необходим реинжиниринг существующей энергосистемы, путем создания альтернативной подсистемы электрогенерирования на принципах интегрирования ресурсов малой и возобновляемой энергетики

Заключение.

В работе исследован кибер-подход к энергообеспечению системы территориальной воздушной мобильности на примере локальной урбанизированной территории, предложена концептуальная парадигма энергообеспечения данной территории на базе восстанавливаемых источников энергообеспечения. В качестве методологии исследований ресурсов региональной возобновляемой энергетики в городской воздушной мобильности использован геосистемный подход, в котором геосистема рассматривается как динамическая композиция природных и искусственных подсистемных иерархий и ресурсов таких как: ветровые, солнечные ресурсы, ресурсы малой гидроэнергетики, теплонасосы и водородная энергетика. В результате экспертизы существующих и перспективных систем генерации электроэнергии на территории РК, с целью оценки перспектив предстоящего инвестирования в эту область, было выявлено, что наибольшее предпочтение эксперты отдают малой атомной энергетике. С целью оптимального социально-экономического решения в области развития энергетического обеспечения региона на базе возобновляемых источников электроэнергии была разработана организационно-техническая целевая кибер-модель, состоящая из энерго-производителей на возобновляемых энерго-платформах в составе генерирующих частных агентов с единой диспетчеризацией. Для прогнозирования результативности, интегрированной в единую региональную кибер-среду объектов возобновляемой электроэнергетики, были построены регрессионные модели. Для исследования функционала энергосистемы, работающей без вмешательства человека в управление, была разработана имитационная модель, программное приложение и проведен компьютерный эксперимент. Результаты эксперимента представлены в графическом формате.

Список литературы

1. Hanna, R., Kreindler, G. & Olken B. (2021). Citywide effects of high-occupancy vehicle restrictions: Evidence from “three-in-one” in Jakarta. *Science* 2017, 357, 89-93. <https://doi.org/10.1126/science.aan2747>
2. Eliasson, J. Efficient transport pricing—why, what, and when? *Communications in Transportation Research* 2021, 1, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2021.100006>.
3. Wang, K. & Qu, X. (2023). Urban aerial mobility: Reshaping the future of urban transportation. *The Innovation* 2023, 4, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100392>.
4. Urban air mobility: Is this a different way of saying “aviation in cities”. *Uniting Aviation* (10 июля 2019). Дата обращения: 10 ноября 2019.
5. Сюй, Дж., Гуань, К., Ван, Ю., Чжуан, Дж. & Ган, В. (2025). Систематический обзор развития городской воздушной мобильности: технологические вызовы беспилотников eVTOL и политика на малых высотах в Шэньчжэне. *Дроны* 9, 842. <https://doi.org/10.3390/drones9120842>.
6. Gipson, L. (2017). NASA Embraces Urban Air Mobility, Calls for Market Study; NASA: Washington, DC, USA, Volume 7.
7. Wang, G., Hu, Y., Song, B. & Tan, C. (2015). Optimization design and flight time evaluation of electric unmanned aerial vehicle power system. *J. Aerosp. Power* 30, 1834–1840. [Google Scholar].
8. Frederick, Z.J., Hallock, T.J., Ozoroski, T.A., Chapman, J.W., Kuhnle, C.A. & Frederic, P.C. (2023). Design Exploration of a Mild Hybrid Electrified Aircraft Propulsion Concept. In *Proceedings of the AIAA AVIATION 2023 Forum*, San Diego, CA, USA, 12–16 June p. 4226. [Google Scholar]
9. Liu, L., Du, M., Zhang, X., Zhang, C., Xu, G. & Wang, Z. (2016). Conceptual design and energy management strategy for UAV with hybrid solar and hydrogen energy. *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* 37, 144–162. [Google Scholar].

9. Stroeve, S. H., Blom, H. A. P. & (Bert) Bakker, G. J. (2008). Systemic accident risk assessment in air traffic by Monte Carlo simulation,” *Safety Science*, vol. 47, no. 2, pp. 238–249, Jun., doi: 10.1016/j.ssci.2008.04.003.
10. Ni, X., Wang, H., Che, C., Hong, J. & Sun Z. (2019). Civil aviation safety evaluation based on deep belief network and principal component analysis. *Safety Science*. Vol. 112, pp. 90-95, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.10.012>
11. Li, X. et al. (2024). "IMTCN: An Interpretable Flight Safety Analysis and Prediction Model Based on Multi-Scale Temporal Convolutional Networks," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 289-302, Jan. doi: 10.1109/TITS.2023.3308988. keywords:
12. Yang, L. & Chen, X. (2023). Research on data-driven flight safety risk assessment and time series forecasting method. *IEEE 5th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)*, Dali, China, 2023, pp. 480-485, doi: 10.1109/ICCASIT58768.2023.10351761.
13. Друкер, П. (2002). Эффективное управление –М.: ФАИР-ПРЕСС, -288 с.
14. Бир Ст. Кибернетика и управление производством. Изд-во «Наука», 1965.
15. Соколов, А.В. (2007). Форсайт: взгляд в будущее. Форсайт, №1 (1), С. 8-15.

References

1. Hanna, R., Kreindler, G. & Olken, B. (2017). Citywide effects of high-occupancy vehicle restrictions: Evidence from “three-in-one” in Jakarta. *Science*, 357, 89-93. <https://doi.org/10.1126/science.aan2747> Eliasson, J. Efficient transport pricing—why, what, and when? *Communications in Transportation Research* 2021, 1, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2021.100006>.
2. Wang, K. & Qu, X. (2019). Urban aerial mobility: Reshaping the future of urban transportation. *The Innovation* 2023, 4, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100392>.
3. Urban air mobility: Is this a different way of saying “aviation in cities”. *Uniting Aviation Data obrashcheniya: 10 noyabrya 2019*.
4. Syuj, Dzh., Guan', K., Van, Yu., Chzhuan, Dzh. & Gan, V. (2025). Sistematischeskij obzor razvitiya gorodskoj vozduшной mobil'nosti: tehnologicheskie vyzovy bespilotnikov eVTOL i politika na mal'nykh vysotah v Shehn'chzhene. *Drony* 9, 842. <https://doi.org/10.3390/drones9120842>.
5. Gipson, L. (2017). NASA Embraces Urban Air Mobility, Calls for Market Study; NASA: Washington, DC, USA, Volume 7.
6. Wang, G., Hu, Y., Song, B. & Tan, C. (2015). Optimization design and flight time evaluation of electric unmanned aerial vehicle power system. *J. Aerosp. Power*, 30, 1834–1840. [Google Scholar].
7. Frederick, Z.J., Hallock, T.J., Ozoroski, T.A., Chapman, J.W., Kuhnle, C.A. & Frederic, P.C. (2023). Design Exploration of a Mild Hybrid Electrified Aircraft Propulsion Concept. In *Proceedings of the AIAA AVIATION 2023 Forum*, San Diego, CA, USA, 12–16 June, p. 4226. [Google Scholar]
8. Liu, L., Du, M., Zhang, X., Zhang, C., Xu, G. & Wang, Z. (2016). Conceptual design and energy management strategy for UAV with hybrid solar and hydrogen energy. *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* 37, 144–162. [Google Scholar].
9. Stroeve, S. H., Blom H. A. P. & G. J. (Bert) (2008). Bakker, “Systemic accident risk assessment in air traffic by Monte Carlo simulation,” *Safety Science*, vol. 47, no. 2, pp. 238–249, Jun., doi: 10.1016/j.ssci.2008.04.003.
10. Ni, H., Wang, N., Che, S., Hong, J. & Sun Z. (2019). Civil aviation safety evaluation based on deep belief network and principal component analysis. *Safety Science*. Vol. 112, rr. 90-95, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.10.012>
11. Li, X. et al. (2024). "IMTCN: An Interpretable Flight Safety Analysis and Prediction Model Based on Multi-Scale Temporal Convolutional Networks," in *IEEE Transactions on*

Intelligent Transportation Systems, vol. 25, no. 1, pp. 289-302, Jan., doi: 10.1109/TITS.2023.3308988. keywords:

12. Yang, L. & Chen, X. (2023). Research on data-driven flight safety risk assessment and time series forecasting method. IEEE 5th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), Dali, China, pp. 480-485, doi: 10.1109/ICCASIT58768.2023.10351761.

13. Druker, P. (2002). Ehffektivnoe upravlenie –M.: FAIR-PRESS, 288 s.

14. Bir St. Kibernetika i upravlenie proizvodstvom. Izd-vo «Nauka», 1965.

15. Sokolov, A.V. (2007). Forsajt: vzglyad v budushchee. Forsajt, №1 (1), S. 8-15.

АУМАҚТЫҚ АЭРОМОБИЛЬДІЛІККЕ АРНАЛҒАН ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯНЫҢ КИБЕРМОДЕЛІ

Аңдатпа. Мақалада қалалық әуе қозғалысына арналған интеграцияланған энергиямен жабдықтау жүйесінің тұжырымдамалық моделі ұсынылған. Мақаланың мақсаты - қалалық әуе қозғалысына арналған жүйенің беріктігін арттыру. UAM энергетикалық инфрақұрылымының агенттеріне мыналар жатады: eVTOL ұшақтары; жоғары қуатты зарядтау станцияларымен жабдықталған вертипорттар; жоғары жылдамдықты зарядтау жүйелері; энергия сақтау жүйелері; жаңартылатын энергия көздері. UAM үшін аймақтық жаңартылатын энергияны цифрлық түрлендірудің негізгі аспектілері: Ақылды желілер: жасанды интеллект; Заттар интернеті; зарядтау инфрақұрылымы. Вертипорттардың энергетикалық жүйелері қалалық электр желілерімен және төмен биіктіктегі экономикамен біріктірілген. Қалалық инфрақұрылымды дамыту әуе қозғалысына арналған жүйені электр энергетикасы саласының жалпы тұжырымдамасына, соның ішінде инфрақұрылымды бақылауға біріктіреді, бұл Қазақстанда 2025-2031 жылдарға арналған азаматтық пилотсыз авиацияны дамыту жоспарларында көрсетілгендей. Геожүйелер тәсілі қалалық әуе қозғалысына арналған аймақтық жаңартылатын энергия ресурстарын тақырыптық зерттеу әдіснамасы ретінде қолданылады. Соңғы тұжырымдамалық нұсқада қойылған есептердің шешімі аумақтық интеграцияланған векторлық 2-D жүйесі ретінде қарастырылады: тік вектор - геожүйе, ал көлденең вектор - электр энергетикасы саласы. Шешілетін мәселелер ықтималдық, модельдеу, агент, сараптамалық формальды болжау құралдары жұмыс істейтін кибержүйелік модельдеуге қатысты. Мақаладағы болжау модельдеу құралдары электр энергетикасын дамытудың интеграцияланған жүйесіндегі рангтік басымдықтарды бағалау үшін пайдаланылды. Энергетика дамуының келесі салалары үшін маңыздылық рангтері табылды: Келесілер зерттелді: Бағалаулар зерттелді: көмірмен жұмыс істейтін электр энергиясы; ірі көлемді ядролық электр энергиясы; ірі көлемді гидроэлектростанция; шағын гидроэлектростанция; жел электр энергиясы; күн электр энергиясы; жылу сорғылары; шағын атом электр энергиясы; интеграцияланған жаңартылатын энергия көздері; сутегі электр энергиясы. Шағын ядролық энергияға ең көп басымдық берілді, ал екінші басымдық шағын гидроэлектростанцияға берілді. Бұл нәтижелер аймақтың табиғи, климаттық, әлеуметтік-экономикалық және аумақтық-географиялық сипаттамаларымен тығыз байланысты.

Түйін сөздер: жүйе, энергетика, кибертехнология, тәуекел, математикалық бағдарламалық қамтамасыз ету, техникалық қолдау, модельдеу модельдері.

CYBER-MODEL OF RENEWABLE ENERGY FOR TERRITORIAL AIR MOBILITY

Abstract. This article proposes a conceptual model for an integrated energy supply system for Urban Air Mobility (UAM). The aim is to enhance the robustness of the UAM system. UAM energy infrastructure agents include eVTOL aircraft, vertiports equipped with high-capacity charging

stations, high-speed charging systems, energy storage systems, and renewable energy sources. Key aspects of the digital transformation of regional renewable energy for UAM include smart grids, artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), and charging infrastructure. Vertiport energy systems are integrated with urban power grids and the low-altitude economy. Urban infrastructure development integrates the air mobility system into the broader electric power framework—including infrastructure monitoring—in alignment with Kazakhstan's civil unmanned aviation development plans for 2025–2031. A geosystem approach was employed as the methodology for examining regional renewable energy resources within the context of urban air mobility. In the final conceptual model, the solution is framed as a spatially integrated 2D vector system: a vertical vector representing the geosystem and a horizontal vector representing the electric power sector. The tasks addressed fall within the realm of cyber-system modeling, utilizing probabilistic, simulation, agent-based, and expert-driven formal foresight tools. Foresight modeling tools were applied to assess priority rankings within the integrated power sector development system. Significance rankings were determined for the following energy development areas: coal-fired power generation, large-scale nuclear power, large-scale hydropower, small-scale hydropower, wind power, and solar power. heat pumps; small-scale nuclear power; integrated renewable energy sources; hydrogen-based power generation. Small-scale nuclear power was given the highest priority, followed by small-scale hydropower. These results are closely linked to the region's natural-climatic, socio-economic, and geographical characteristics.

Keywords: system, energy sector, cyber-technology, risk, mathematical support, technical support, simulation models.

Авторлар туралы мәлімет

Муратхан Бибігүл	Докторант, Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан
Кошеков Кайрат Темирбаевич	Д.т.н. профессор, Алматы, Қазақстан, E-mail: kkoshekov@mail.ru
Керибаева Талшын Бақытжанқызы	PhD, «Авиациялық техника және технологиялар» кафедрасының ААА қауымдастырылған профессоры, Азаматтық Авиация Академиясы, Алматы, Қазақстан, E-mail: talshyn.keribayeva@agakaz.kz

Сведение об авторах

Муратхан Бибігүл	Докторант, АО «Академия гражданской авиации», г. Алматы, Казахстан.
Кошеков Кайрат Темирбаевич	Д.т.н., профессор, г. Алматы, Казахстан, E-mail: kkoshekov@mail.ru
Керибаева Талшын Бақытжанқызы	PhD, Асс. профессор АГА, кафедры «Авиационная техника и технологии», АО Академия Гражданской Авиации, г. Алматы, Казахстан. E-mail: talshyn.keribayeva@agakaz.kz

Information about the authors

Murat Khan Bibigul	Doctoral candidate, Civil Aviation Academy JSC, Almaty, Kazakhstan.
Koshekov Kairat Temirbaevich	Doctor of Technical Sciences, Professor, Almaty, Kazakhstan E-mail: kkoshekov@mail.ru
Keribayeva Talshyn	PhD, Assoc. Professor ACA, Department of Aviation Engineering and Technologies, Academy of Civil Aviation JSC, Almaty, Kazakhstan, E-mail: talshyn.keribayeva@agakaz.kz



**ӘУЕ КӨЛІГІ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ВОЗДУШНЫЙ ТРАНСПОРТ И ТЕХНОЛОГИИ
AIR TRANSPORT AND TECHNOLOGY**

ӘОЖ 629.78

ГТАХА 89.25.21

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_3

А.Б. Саурбекова^{1*}, Ә.С. Ғұсман¹

¹Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Алматы, Қазақстан

*E-mail: a.saurbekova@aves.kz

**ТӨМЕН ЖЕР ОРБИТАЛАРЫНДА ШАҒЫН ҒАРЫШ АППАРАТТАРЫН
БАСҚАРУДЫҢ ПАЙДАЛЫ ЖҮКТЕМЕСІН ЖӘНЕ БОРТТЫҚ КЕШЕНІН
ЭНЕРГИЯ ТҰТЫНУДЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУДЫҢ ЗАМАНАУИ ТӘСІЛДЕРІ**

***Аңдатпа.** Шағын ғарыш аппараттары, әсіресе CubeSat тәрізді наноспутниктер, шектеулі өлшемдері мен қуат көздерінің аздығына байланысты энергия балансын сақтау мәселесіне жиі тап болады. Мұндай аппараттардың негізгі артықшылығы – олардың салыстырмалы түрде төмен құны, жылдам әзірленуі және ғылыми зерттеулер мен технологиялық сынақтарды жүзеге асыруға қолайлы болуы. Алайда олардың шағын көлемі мен массасы энергиямен қамтамасыз ету жүйесіне қатаң шектеулер қояды. Осыған байланысты энергияны тиімді пайдалану шағын спутниктерді жобалау мен пайдалану кезінде негізгі инженерлік міндеттердің бірі болып саналады.*

Бұл мақалада төменгі Жер орбитасында қызмет ететін шағын спутниктердің пайдалы жүктемесі мен борттық басқару кешенінің энергия тұтынуын төмендету бойынша заманауи тәсілдер талданады. Алдымен шағын ғарыш аппараттарының құрылымдық ерекшеліктері, олардың негізгі жүйелері және энергетикалық балансы қарастырылады. Сонымен қатар энергия тұтыну құрылымына әсер ететін негізгі факторлар, соның ішінде орбиталық жағдайлар, күн панельдерінің тиімділігі және аккумуляторлық жүйелердің сипаттамалары талданады.

Одан кейін пайдалы жүктемелердің, мысалы, оптикалық камералардың, радиобайланыс модульдерінің және түрлі ғылыми сенсорлардың энергиясын үнемдеу әдістері сипатталады. Бұл әдістерге деректерді өңдеудің тиімді алгоритмдерін қолдану, құрылғыларды кезеңдік белсендіру, төмен қуатты режимдерді пайдалану және энергия үнемдейтін электрондық компоненттерді енгізу жатады.

Сондай-ақ борттық басқару жүйелерінің энергия тиімді архитектуралары, микроконтроллерлер мен арнайы процессорларды қолдану мүмкіндіктері қарастырылады. Энергиямен қамтамасыз ету жүйелеріндегі соңғы технологиялық жаңалықтар, интеллектуалды энергия басқару алгоритмдері және қуатты динамикалық бөлу тәсілдері талқыланады. Нақты CubeSat жобаларының деректеріне сүйене отырып, энергияны оңтайландырудың тәжірибелік мысалдары келтіріледі. Сонымен қатар салыстырмалы кестелер арқылы әртүрлі техникалық шешімдердің сипаттамалары талданып, болашақта шағын спутниктердің энергия тиімділігін арттыру бағыттары бойынша ұсыныстар жасалады.

***Түйін сөздер:** шағын ғарыш аппараттары, CubeSat, энергия тұтынуын оңтайландыру, пайдалы жүктеме, борттық басқару жүйесі, электр қуат жүйесі, энергия тиімділігі, төменгі Жер орбитасы.*

Кіріспе.

CubeSat санатындағы наноспутниктер ғарышты зерттеу мен жерді зондтау салаларында кең қолданыс табуда. Дегенмен, олардың шағын корпусы мен шектеулі беткі ауданы орбитада жеткілікті электр энергиясын өндіруге және сақтауға күрделі шектеулер қояды. Шағын аппараттардың арзан, жылдам дайындалуы және жаппай ұшырылуы мүмкіндігі көптеген ғылыми, коммерциялық және әскери миссияларды қызықтырады. Бірақ дәл осы артықшылықтар аясында энергиямен қамтамасыз ету басты шектеуші факторлардың бірі болып қалып отыр – шағын спутник бортында миссия талаптарын орындау үшін жеткілікті қуатты өндіру және сақтау басты қиындық саналады. Мысалы, CubeSat платформасына талап етілетін күрделі жүктемелерді (оптикалық лидар, жоғары өнімді байланыс жүйелері, т.б.) орналастырғанда, электр қуатын тұтыну ең өзекті мәселе ретінде туындайды.

Бұл шолуда алдымен шағын спутниктің типтік құрылымы мен энергия балансына тоқталып, одан әрі пайдалы жүктемелер мен борттық жүйелердің энергия тұтынуын төмендету тәсілдері қарастырылады. Энергиямен қамтамасыз ету жүйелеріндегі қазіргі заманғы шешімдер (мысалы, ең шекті қуат нүктесін қадағалау, жаңа жоғары тиімді күн батареялары, GaN-транзисторлы түрлендіргіштер және т.б.) және интеллектуалды басқару әдістері сипатталады. Нақты жобалардан алынған мәліметтер негізінде мысалдар келтіріліп, соңында зерттеу нәтижелері қорытындыланып, болашақ бағыттарға ұсыныстар беріледі.

Зерттеу материалдары мен әдістері.

Шағын ғарыш аппараттарының (ША), атап айтқанда CubeSat платформаларының энергетикалық тиімділігін зерттеу үшін жүйелік талдау және математикалық модельдеу әдістері қолданылды. Зерттеудің негізгі нысаны ретінде 3U форматындағы наноспутник алынды, өйткені бұл конфигурация энергия өндіру мен пайдалы жүктеменің көлемі арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді.

Спутниктің құрылымдық моделі және жүйелері

Зерттеу барысында ША-ның жалпы құрылымы келесі негізгі ішкі жүйелерден тұратын модель ретінде қарастырылды:

- Пайдалы жүктеме: оптикалық камера және ғылыми сенсорлар;
- Борттық есептеуіш кешені (OBC): ARM Cortex-M негізіндегі энергия тиімді микроконтроллер;
- Электр қуат жүйесі (EPS): Күн панельдері, MPPT контроллері және Li-ion аккумуляторлар блогы [1].

Спутниктің ішкі архитектурасы мен компоненттерінің орналасуы SolidWorks ортасында жобаланды (1-суретті қараңыз). Бұл модель аппараттың массалық-инерциялық сипаттамаларын және күн панельдерінің тиімді ауданын дәл анықтауға мүмкіндік берді.



Сурет 1 – Шағын ғарыш аппаратының жалпы құрылымы

Энергетикалық баланстың математикалық моделі.

Энергетикалық баланс – спутник жұмысының маңызды бөлігі. Орбитадағы орташа генерация (Орташа орбиталық қуат, ОАР) спутник тұтынатын орташа қуаттан асуы немесе тең болуы тиіс. CubeSat форм-факторының қуат мүмкіндіктері шектеулі:

Кесте 1 – CubeSat платформаларының энергетикалық сипаттамаларын салыстыру

Параметр	1U CubeSat	3U CubeSat	6U CubeSat
Өлшемі	10 × 10 × 10 см	30 × 10 × 10 см	шамамен 10 × 20 × 30 см
Күн панелінің бір жағының ауданы	≈100 см ²	1U-ға қарағанда 3–4 есе үлкен	Ашылатын панельдермен айтарлықтай үлкен
Фотоэлемент тиімділігі	25–30% (GaAs көпқабатты)	25–30%	25–30%
Бір панельден максимал қуат	≈2 Вт	≈7–8 Вт	бірнеше панель арқылы ондаған ватт
Орбиталық орташа қуат (ОАР)	≈1.9–2.3 Вт	бірнеше ватт (1U-дан әлдеқайда жоғары)	Жер маңында ≈35 Вт
Марс орбитасындағы қуат	—	—	≈17 Вт
Пайдалы жүктеме мүмкіндігі	Тек қарапайым датчиктер	Күрделірек ғылыми жабдықтар	Жоғары энергия қажет ететін миссиялар
Қуатты арттыру әдістері	Тұрақты панельдер	Үлкен панель ауданы	Ашылатын күн қанаттары
Энергия сақтау	Литий-ион аккумуляторлар	Литий-ион аккумуляторлар	Литий-ион аккумуляторлар

Төменгі Жер орбитасындағы (LEO) ША жұмысын модельдеу үшін келесі есептеу әдістемесі қолданылды. Орбитаның толық периоды (T_{orbit}) 94 минутқа тең деп алынды, оның ішінде күн сәулесі түсетін фаза (T_{sun}) 60 минутты, ал Жердің көлеңкесіндегі фаза ($T_{eclipse}$) 34 минутты құрайды.

Орташа орбиталық қуатты (P_{avg}) анықтау үшін кеңейтілген формула қолданылды:

$$P_{avg} = \frac{P_{sa} \cdot T_{sun} \cdot \eta_{sol} \cdot \eta_{reg}}{T_{orbit}}$$

мұндағы:

P_{sa} – күн панельдерінің максималды қуаты;

$T_{sun} \cdot \eta_{sol}$ – орбитаның күн түсетін бөлігіндегі уақыт;

η_{sol} – зарядтау контроллерінің ПӘК-і (MPPT);

η_{reg} – кернеу реттегіштерінің ПӘК-і;

T_{orbit} – толық орбиталық период.

Бұл модель энергияны тұтынудың динамикалық профильдерін құруға және пайдалы жүктеменің жұмыс режимдерін оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Қуат тұтыну бюджеті. Спутниктің әрбір ішкі жүйесі тұтынатын қуаттың нақты балансын есептеу – жобалау кезеңінің маңызды бөлігі. Орбитадағы жұмыс кезінде жүйелер әр уақытта әртүрлі режимде болуы мүмкін, сондықтан жобалаушылар қуат бюджеті деп аталатын кесте жасайды – онда әр операциялық режимде (қалыпты ұшу, байланыс сеансы,

ғылыми дерек жинау, төтенше жағдай және т.б.) әрбір ішкі жүйенің қуат тұтынуы және жұмысының мерзімі (күндіз/түнде, пайыздық duty cycle) ескеріледі. Мысалы, 2U форматты SOC-і наноспутнигінің есептік қуат бюджетінің үзіндісі төменде келтірілген. Бұл аппараттың негізгі тұтынушылары – байланыс радиокұралы, реакциялық доңғалақтар блогы (ADCS атқарушылары) және борттық компьютер екені көрінеді; олардың әрқайсысы өз шыңдық қуатына ие, бірақ орбитада орташа алғанда төмендеу үлесін ғана қолданады (себебі үнемі қосулы емес немесе үнемі толық жүктемеде емес) [2].

Кесте 2 – 2U CubeSat (SOC-і миссиясы) қуат бюджетінің үлгісі

Ішкі жүйе	Орбиталық орташа қуаты (мВт)
Байланыс жүйесі (радио)	652
Бағдарлау жүйесі	600
Борттық компьютер (OBC)	398
Датчиктер (күн, магнитометр т.б.)	104
Батарея қыздырғышы және т.б.	425
Түрлендіру тиімділігінің жоғалуы	308
Барлық жүктеменің суммасы	~2487
Орбита бойынша өндіру (орташа)	~3182

Орбитадағы орташа генерация ~3,18 Вт, ал орташа тұтыну ~2,4 Вт құрайды, демек 28% артық маржа бар екені есептелген. Бұл маржа батареяны толық қуаттап, болжанбаған қосымша тұтыну пайда болса өтеуге қажет қор ретінде қалдырылады. Қуат бюджеті спутник миссиясының әр сатысында қайта қаралып, нақтыланып отырады және борттық құралдарды қосу-кесу кестесі де осы есептерге негізделіп жасалады. Қорыта айтқанда, шағын ғарыш аппараттарында қолжетімді энергия өте шектеулі болғандықтан, әрбір милливатт қуатты есепке алып, жүйелердің жұмыс уақытын мұқият жоспарлау талап етіледі. Келесі бөлімдерде осы қуатты тиімді пайдаланудың әдістері қарастырылады [3].

Пайдалы жүктеменің энергия тұтынуын төмендету әдістері.

Пайдалы жүктеме – спутниктің негізгі миссиясын орындайтын құрылғылар (камералар, ғылыми датчиктер, байланыс модульдері, эксперименттік құрылғылар). Бұл жүйелер әдетте спутниктегі ең көп энергия тұтынатын элементтер болып табылады, өйткені олар деректер жинау, өңдеу және жіберу сияқты күрделі операцияларды орындайды.

Шағын спутниктерде энергия ресурсы шектеулі болғандықтан, пайдалы жүктеменің қуат тұтынуын азайту маңызды. Бұл үшін бірнеше негізгі тәсіл қолданылады: жұмыс циклін (duty cycle) шектеу, жүйелердің жұмыс уақытын дұрыс жоспарлау, төмен қуатты аппараттық шешімдерді пайдалану және жүйелердің қауіпсіз әрі тиімді жұмыс режимдерін қолдану [4].

Duty cycle әдісі бойынша пайдалы жүктеме тек қажетті уақытта ғана іске қосылады. Мысалы, оптикалық камералар Жердің жарық жағында болғанда ғана суретке түсіреді, ал қалған уақытта өшіріледі. Әдетте олардың белсенді жұмыс уақыты орбитаның шамамен 10–30% бөлігін ғана құрайды. Сол сияқты радиобайланыс жүйелері де тек жерүсті станция көрінген кезде ғана қосылады.

Сонымен қатар спутниктегі қуатты көп қажет ететін жүйелер бір уақытта емес, кезекпен жұмыс істейді. Мысалы, суретке түсіру кезінде басқа жүйелер уақытша күту режиміне ауыстырылып, барлық энергия камераға бағытталуы мүмкін. Мұндай жоспарлау энергияны тиімді пайдалануға мүмкіндік береді. Энергия тиімділігін арттыру үшін төмен қуатты электроника да пайдаланылады. Мысалы, жаңа CMOS-камералар, реттелетін қуатты радиомодульдер және энергия үнемдейтін датчиктер қолданылады. Сонымен қатар құрылғылар standby режиміне ауысып, қажет емес кезде энергия тұтынуды азайтады.

Энергия үнемдеу әдістері спутниктің қызып кетуінің алдын алуға да көмектеседі. Сондықтан энергияны тиімді пайдалану спутниктің сенімді және ұзақ жұмыс істеуінің маңызды шарты болып табылады [5].

Кесте 3 – Пайдалы жүктеменің энергия тұтынуын азайту әдістері

Әдіс	Сипаттамасы	Мысал
Duty cycle (жұмыс циклін шектеу)	Құрылғыны тек қажет кезде қосып, қалған уақытта өшіру	Камера тек Жердің жарық бөлігінде жұмыс істейді
Жүйелерді уақыт бойынша жоспарлау	Қуатты көп қажет ететін жүйелерді бір уақытта емес, кезекпен іске қосу	Камера жұмыс істегенде ADCS немесе басқа жүйелер күту режиміне өтеді
Төмен қуатты аппараттық шешімдер	Энергия тиімді электроника мен датчиктер қолдану	CMOS камералар, төмен қуатты радиомодульдер
Реттелетін жұмыс режимдері	Құрылғылардың бірнеше қуат режимдерін пайдалану	Радиобайланыс модулі төмен қуатты режимде жұмыс істейді
Термалдық басқару	Құрылғыларды ұзақ уақыт қоспау арқылы қызып кетуді болдырмау	Оптикалық құралдарды шектеулі уақыт қолдану

Нәтижелер және оларды талқылау.

Борттық басқару кешенінің энергия тиімді архитектурасы мен технологиялары. Борттық басқару кешені – спутниктің командалық және дерек өңдеу жүйелерінің жиынтығы. Оған борттық компьютер, микроконтроллерлер, датчиктерді басқару схемалары, навигация процессорлары және басқа басқарушы модульдер кіреді. Шағын спутниктерде энергия ресурстары шектеулі болғандықтан, қуатты көп қажет ететін процессорлардың орнына энергия тиімді микроконтроллерлер қолданылады.

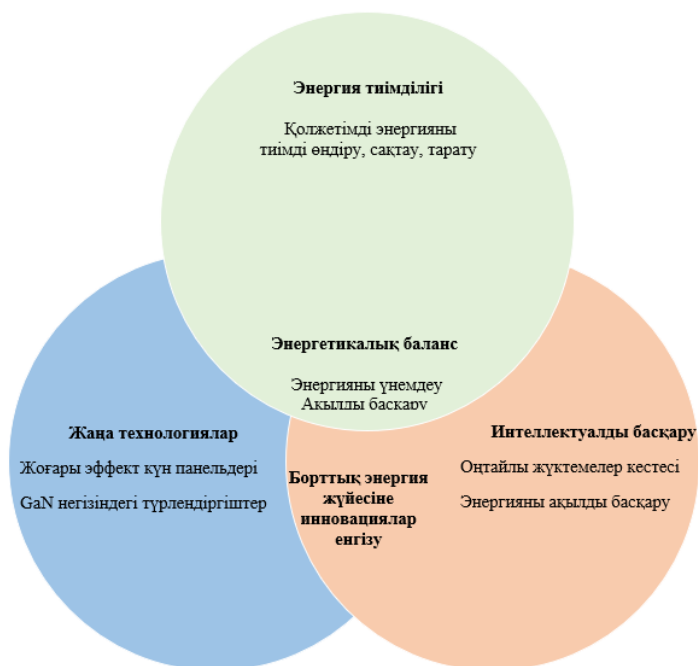
Қазіргі CubeSat аппараттарында борттық компьютер көбіне ARM Cortex-M негізіндегі микроконтроллерлерге сүйенеді. Мұндай жүйелер миллиондаған операция орындаса да өте аз энергия тұтынады. Мысалы, NanoMind немесе CubeComputer модульдері 0,1–0,5 Вт шамасында ғана қуат тұтынады. Ал әмбебап процессорлар (мысалы Raspberry Pi) 2–3 Вт тұтынуы мүмкін, бұл шағын спутник үшін тым жоғары көрсеткіш. Сонымен қатар радиацияға төзімді және энергия үнемдейтін микроконтроллерлер (мысалы, Vorago VA10820) де қолданыла бастады [6].

Энергия тиімділігін арттыруда бағдарламалық архитектура да маңызды рөл атқарады. Борттық компьютер үнемі толық жүктемеде жұмыс істемей, тапсырмалар болмаған кезде sleep немесе standby режиміне ауысады. Процессор тек қажетті сигнал немесе үзіліс келгенде ғана іске қосылады. Кейбір жобаларда энергия үнемдеу үшін екі деңгейлі архитектура пайдаланылады: бір төмен қуатты микроконтроллер жүйені бақылап тұрады, ал негізгі процессор тек күрделі есептеулер қажет болғанда ғана қосылады.

Спутник электроникасында орталықтандырылған және таратымды архитектуралар қолданылады. Орталықтандырылған жүйеде барлық құрылғылар бір борттық компьютер арқылы басқарылады. Ал таратымды архитектурада әрбір модульдің жеке басқарушысы немесе қуат түрлендіргіші болады, бұл қажет емес жүйелерді толық өшіруге мүмкіндік береді және энергия шығынын азайтады. Қазіргі CubeSat жобаларында осы екі тәсілдің гибриді нұсқалары жиі қолданылады [7].

Борттық басқару кешеніне бағдарлау және орнықтыру жүйесі (ADCS) сияқты қосымша жүйелер де кіреді. Бұл жүйеде гироскоптар, магнитометрлер, реакциялық доңғалақтар және магниттік катушкалар қолданылады. Кейбір компоненттер едәуір энергия тұтынатындықтан, энергия үнемдеу үшін пассивті тұрақтандыру әдістері немесе тиімді басқару алгоритмдері пайдаланылады.

Жалпы алғанда, борттық басқару кешенінің энергия тиімділігі аппараттық және бағдарламалық шешімдерді дұрыс үйлестіру арқылы қамтамасыз етіледі. Төмен қуатты микроконтроллерлерді қолдану, ұйқы режимдерін пайдалану және жүйелерді қажетті уақытта ғана іске қосу шағын спутниктердің энергетикалық тиімділігін айтарлықтай арттырады.



Сурет 2 – CubeSat энергиялық тиімділігі саласындағы негізгі бағыттар мен шешімдер

Энергиямен қамтамасыз ету жүйесі: заманауи шешімдер мен интеллектуалды басқару.

Электр қуат жүйесі (EPS) – спутниктің барлық жүйелерін энергиямен қамтамасыз ететін негізгі бөлігі. Ол энергияны өндіреді, сақтайды, тұтынушыларға таратады және бүкіл процесті бақылайды. EPS тиімділігін арттыру шағын спутниктердің энергетикалық мүмкіндігін кеңейтудің маңызды жолы болып табылады [8].

Қазіргі наноспутниктерде энергия өндіру үшін негізінен көпқабатты GaInP/GaAs/Ge күн элементтері қолданылады, олардың тиімділігі шамамен 28–30%. Жаңа зерттеулерде тиімділігі 32–35% болатын 4–5 қабатты күн элементтері қарастырылуда. Сонымен қатар ашылатын күн панельдерін қолдану және спутникті Күнге бағыттау арқылы энергия өндіруді арттыруға болады. Күн панельдерінің тиімділігін арттыру үшін MPPT (Maximum Power Point Tracking) технологиясы қолданылады. Бұл әдіс панельдің кернеуі мен тогын оптималды деңгейде ұстап, әртүрлі жарық жағдайында максималды қуат алуға мүмкіндік береді. MPPT қолдану энергия өндірісін шамамен 20–40% арттыра алады.

Энергияны тұтынушыларға жеткізу үшін жоғары тиімді DC-DC түрлендіргіштері пайдаланылады. Қазіргі импульстік түрлендіргіштердің тиімділігі 90–95% дейін жетеді. Соңғы жылдары галлий нитриді (GaN) негізіндегі транзисторларды қолдану арқылы түрлендіргіштердің тиімділігі мен жұмыс жиілігі арттырылуда. Энергияны сақтау үшін шағын спутниктерде көбінесе литий-ион немесе литий-полимер аккумуляторлары пайдаланылады. Олар жоғары энергия тығыздығына ие және ұзақ қызмет етеді. EPS жүйесі аккумулятор кернеуін, температурасын және заряд деңгейін бақылап, артық заряд немесе терең разрядтан қорғайды. Сонымен қатар батареяларды теңестіру (balancing) және автоматты жүктемені ажырату функциялары қолданылады [9-11].

Қазіргі спутниктерде интеллектуалды қуат менеджменті енгізілуде. EPS микроконтроллері панельдердің тогын, батареяның күйін және жүктеме деңгейін бақылап, энергия тапшылығы кезінде кей жүйелерді уақытша өшіреді немесе энергияны үнемдеу

режиміне ауыстырады. Жалпы алғанда, күн панельдерінің жаңа технологиялары, МРРТ әдісі, жоғары тиімді түрлендіргіштер және интеллектуалды басқару алгоритмдері шағын спутниктердің энергия жүйесінің тиімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік береді.

Нақты жобалардан энергия оңтайландыру тәжірибелері.

SOC-i (2U CubeSat, 2021) – АҚШ-та жасалған студенттік технологиялық демонстратор. Спутниктің орташа энергия тұтынуы шамамен 2,5 Вт, ал күн панельдері өндіретін қуат 3,2 Вт болды (шамамен 28% энергия қоры). Энергия балансын сақтау үшін бірнеше тәсіл қолданылды: төмен қуатты UHF радиобайланыс (0,5 Вт), жүйелердің жұмыс уақытын шектеу, реакциялық доңғалақтарды тек қажет кезде пайдалану, энергия тиімді микроконтроллер негізіндегі OBC қолдану. Нәтижесінде спутник энергия тапшылығынсыз тұрақты жұмыс істеді [12].

Mars Cube One (MarCO-A/B, 6U CubeSat, 2018) – NASA-ның Марсқа ұшқан алғашқы CubeSat аппараты. Жер маңында күн панельдері 35 Вт қуат өндірсе, Марс орбитасында тек 17 Вт ғана өндірді. Байланыс кезінде спутник антеннаны Жерге бағыттағандықтан, панельдер Күнге дұрыс бағытталмайды. Сондықтан байланыс алдында батареяларды толық зарядтап, байланыс кезінде сол энергияны пайдалану стратегиясы қолданылды. Бұл миссия шағын спутниктердің планетааралық миссияларда да жұмыс істей алатынын көрсетті.

Planet Labs «Dove» (3U CubeSat) – Жерді бақылауға арналған коммерциялық спутниктер шоқжұлдызы. Аппараттарда ашылатын күн панельдері қолданылып, орташа ≈ 10 Вт қуат өндірілді. Камералар тек күндіз жұмыс істеп, түнде деректерді жіберу режимі қолданылды. Орташа энергия тұтынуы шамамен 5 Вт болды [13-15].

Басқа миссиялар да энергияны үнемдеу әдістерін қолданады. Мысалы:

1. LightSail-2 – күн желкені эксперименті;
2. QB50 – ғылыми датчиктерді қысқа уақытқа ғана қосу;
3. Lunar IceCube – қуатты иондық қозғалтқышты тек күн жарығында іске қосу.

Жалпы алғанда, әр CubeSat миссиясы энергияны тиімді пайдалану үшін өз стратегиясын қолданады. Негізгі мақсат – шектеулі энергия ресурстарынан максималды тиімділік алу [16].

MATLAB/Simulink ортасында жүргізілген есептеулер.

Зерттеу барысында 3U форматындағы шағын ғарыш аппаратының (ША) энергетикалық теңгерімін верификациялау үшін MATLAB/Simulink ортасында имитациялық модельдеу жүргізілді. Модельдеудің негізгі мақсаты — пайдалы жүктеменің жұмыс циклін (*Duty Cycle*) оңтайландыру арқылы аккумулятордың заряд деңгейін (SoC) қауіпсіз шекте сақтау мүмкіндігін дәлелдеу.

Жүргізілген есептеулер нәтижесінде ША-ның бір орбиталық витоктағы (94 минут) қуат бюджеті келесідей анықталды:

- Генерация: Күн фазасында (60 мин) орташа қуат 8 Вт құрады, бұл жалпы 8 Вт*сағ энергия береді.
- Тұтыну (оңтайландыруға дейін): Пайдалы жүктеме мен байланыс жүйесі үнемі қосылу болған жағдайда орташа тұтыну 4.5 Вт-ты құрап, аккумулятордың тез разрядталуына әкелді.

Тұтыну (оңтайландырудан кейін): Интеллектуалды басқару алгоритмі арқылы пайдалы жүктемені тек күн фазасында 15 минутқа қосу режимі енгізілді. Бұл орташа орбиталық тұтынуды 2.4 Вт-қа дейін төмендетті.

Модельдеу нәтижелері көрсеткендей, оңтайландырылған режимде аккумулятордың заряд деңгейі (SoC) ең төменгі нүктеде 74%-дан аспайды, бұл литий-ионды батареялардың қызмет ету мерзімін ұзарту үшін оңтайлы көрсеткіш болып табылады.

Төменде ША-ның бір витоктағы энергетикалық динамикасын есептейтін алгоритмнің бағдарламалық коды келтірілген:

$$t = 0:1:94;$$

$$P_{max} = 8.0;$$

$Eff_{sys} = 0.85;$

$P_{gen} = (t \leq 60) * P_{max} * Eff_{sys};$

$P_{load} = 1.8 * ones(size(t));$

$P_{load}(70:85) = P_{load}(70:85) + 4.5;$

$Net_Power = P_{gen} - P_{load};$

$SoC = 80 + cumsum(Net_Power)/60/20*100;$

$SoC = \min (SoC, 100);$

$plot(t, SoC, 'LineWidth', 2, 'Color', [0.447 0.741]);$

$grid on;$

$title('Аккумулятордың заряд деңгейінің (SoC) динамикасы');$

$xlabel('Уақыт (минут)');$

$ylabel('Заряд (%');$

$ylim([70 105]);$



Сурет 3 – Оңтайландырылған жұмыс режиміндегі аккумулятордың заряд деңгейінің (SoC) динамикасы

Модельдеу нәтижесі Күн панельдерінен келетін энергияның борттық жүйелерді қамтамасыз етуге және аккумуляторды толық зарядтауға жеткілікті екенін көрсетті. Күн фазасының 50-минутында заряд деңгейі 100%-ға жетіп, ЭҚЖ-ның жоғары өнімділігін дәлелдеді. Көлеңкелі фазадағы белсенді жұмыс режиміне қарамастан, аккумулятор заряды 94%-дан төмендеген жоқ. Тұтыну режимдерін кезекпен қосу әдісі аккумулятордың терең разрядталуына жол бермей, миссияның өміршеңдігін сақтады. Алынған деректер аппараттың энергетикалық бюджетінің оң балансын және таңдалған басқару алгоритмінің тиімділігін толық растайды.

Қорытынды.

Шағын ғарыш аппараттары үшін электр энергиясы ең шектеулі және маңызды ресурс болып табылады. CubeSat және басқа наноспутниктердің тиімді жұмыс істеуі олардың энергия жүйесін дұрыс жобалауына және энергия тұтынуын тиімді басқаруына тікелей байланысты. Сондықтан спутниктің энергетикалық мүмкіндіктерін миссияның мақсаттарымен үйлестіру жобалаудың бастапқы кезеңінен бастап ескерілуі тиіс.

Энергетикалық балансқа қол жеткізу – спутник жобасының негізгі талаптарының бірі. Орбитада өндірілетін орташа қуат пен тұтынылатын қуат арасындағы тепе-теңдік сақталмаса, аппарат тұрақты жұмыс істей алмайды. Осы себепті пайдалы жүктемелердің саны мен түрі қолжетімді энергия көлеміне сәйкес таңдалуы қажет. Қажет болған жағдайда спутник өлшемін ұлғайту, күн панельдерінің ауданын арттыру немесе орбиталық параметрлерді оңтайландыру сияқты шешімдер қолданылады. Энергияны үнемдеу

тәсілдерін кешенді түрде қолдану маңызды. Пайдалы жүктемелердің жұмыс уақытын шектеу, жүйелерді кезекпен іске қосу және тек қажет болған жағдайда ғана пайдалану спутниктің жалпы энергия тұтынуын айтарлықтай азайтады. Заманауи технологиялар мен жаңа электрондық компоненттерді қолдану энергия тиімділігін арттыруға көмектеседі. Жоғары тиімді күн батареялары, GaN негізіндегі DC-DC түрлендіргіштері және жоғары энергия тығыздығына ие литий-ион аккумуляторлары спутниктің энергетикалық мүмкіндігін кеңейтеді. Мұндай технологиялар аз қуатпен жұмыс істейтін шағын аппараттар үшін ерекше маңызды.

Сонымен қатар, интеллектуалды энергия басқару жүйелерінің дамуы спутниктердің автономды жұмыс қабілетін арттыруда. EPS жүйелері батарея күйін, жүктемелерді және энергия өндірісін бақылап, қажет жағдайда жүйелердің жұмыс режимін автоматты түрде өзгерте алады. Болашақта мұндай жүйелер жасанды интеллект элементтерімен толықтырылып, спутниктің энергия ресурстарын одан да тиімді басқаруға мүмкіндік беруі ықтимал.

Жалпы алғанда, шағын ғарыш аппараттарының энергия тұтынуын оңтайландыру – пайдалы жүктемеден бастап борттық архитектура мен қуат жүйесіне дейінгі барлық деңгейде қарастырылатын кешенді міндет. Дұрыс жобаланған энергия жүйесі мен тиімді басқару әдістері арқылы шағын спутниктер де күрделі ғылыми, технологиялық және коммерциялық миссияларды сәтті орындай алады. Сондықтан энергия тиімділігі болашақ CubeSat және басқа наноспутник жобаларының негізгі даму бағыттарының бірі болып қала береді

Пайдаланылған әдебиеттер

1. Shakoор, U., et al. (2025). Энергияны басқару тұрғысынан CubeSat электрмен жабдықтау жүйелерін кешенді талдау. Electrical Engineering, Springer. <https://link.springer.com/article/10.1007/s43937-025-00069-5>
2. United Nations Office for Outer Space Affairs & Japan Aerospace Exploration Agency. (б.ж.). CubeSat электрмен жабдықтау жүйелеріне кіріспе. KiboCUBE Academy. <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/kibocube/kibocubeacademy.html>
3. Edpuganti, A., et al. (2021). CubeSat электрмен жабдықтау жүйелерінің архитектурасына кешенді шолу. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/353971086_A_Comprehensive_Review_on_CubeSat_Electrical_Power_System_Architectures
4. Tine, M., et al. (2023). CubeSat наноспутнигіне арналған фотоэлектрлік қуат жүйесін жобалау және модельдеу. International Journal of Trend in Scientific Research and Development, 7 (2). <https://www.ijtsrd.com/papers/ijtsrd99841>
5. Lemmassi, A., Derouich, A., Hanafi, A., Byou, A., Benmessaoud, M., & El Ouanjli, N. (2024). Наноспутниктерде қолданылатын үш өткелді күн элементтеріне арналған төмен шығынды MPPT: P&O және INC алгоритмдерін салыстырмалы зерттеу. e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 7. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100447>
6. Alahmadi, A., et al. (2024). CubeSat электрмен жабдықтау жүйелеріндегі энергияны түрлендірудің тиімді әдістері. Aerospace, 11 (11), 920. <https://doi.org/10.3390/aerospace11110920>
7. Hoseini, S. S., et al. (2022). Жерді бақылайтын наноспутниктердің энергия тұтынуын оңтайландыруға арналған машиналық оқытуға негізделген жаңа тәсіл. Advances in Space Research, 69(1). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.09.015>
8. Bandyopadhyay, S., et al. (2021). Шағын спутниктер тобындағы (constellation) пайдалы жүктемені және ресурстарды бөлуді динамикалық басқару. Journal of Guidance, Control, and Dynamics. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.G005123>
9. Amini, R., et al. (2023). Төмен жер орбитасындағы CubeSat аппараттарына арналған энергияны тиімді пайдаланатын борттық есептеуіш алгоритмдері. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 38 (4). <https://ieeexplore.ieee.org/document/10054321>

10. Wang, J., et al. (2024). Жасанды интеллект көмегімен наноспутниктердің қуат деңгейін болжау және борттық энергияны басқаруды оңтайландыру. *Acta Astronautica*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.11.012>
11. Saeed, N., et al. (2020). CubeSat байланыс жүйелеріндегі қуатты оңтайландыру: Жаңа технологиялар мен мүмкіндіктерге шолу. *IEEE Access*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9091123>
12. Chugh, S., et al. (2022). Шағын ғарыш аппараттарының пайдалы жүктемесін жоспарлау кезіндегі энергия балансын оңтайландырудың заманауи әдістері. *Space Policy*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2022.101492>
13. Kuo, C. L., et al. (2024). Шағын спутниктердің борттық есептеулерінде қуатты үнемдеуге арналған бейімделген тапсырмаларды жоспарлау алгоритмі. *Journal of Spacecraft and Rockets*. <https://doi.org/10.2514/1.A35821>
14. Zhang, Y., et al. (2023). Төмен жер орбитасындағы спутниктер тобына арналған энергияны оңтайландырылған бағыттау және деректерді тасымалдау стратегиялары. *Satellite Communications and Networking*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10123456>
15. Li, X., & Wang, H. (2025). CubeSat пайдалы жүктемелерін басқарудағы терең оқыту (Deep Learning): Энергия тиімділігі мен өнімділік арасындағы теңгерім. *Expert Systems with Applications*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.122000>
16. Pignatti, G., et al. (2022). Шағын ғарыш аппараттарының борттық жүйелеріндегі энергияны басқарудың автономды интеллектуалды жүйелері. *Aerospace Science and Technology*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107612>

References

1. Shakoор, U., et al. (2025). Comprehensive analysis of CubeSat electrical power systems from an energy management perspective. *Electrical Engineering (Springer)*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s43937-025-00069-5>
2. United Nations Office for Outer Space Affairs & Japan Aerospace Exploration Agency. (n.d.). Introduction to CubeSat electrical power systems. KiboCUBE Academy. <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/kibocube/kibocubeacademy.html>
3. Edpuganti, A., et al. (2021). A comprehensive review of CubeSat electrical power system architectures. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/353971086_A_Comprehensive_Review_on_CubeSat_Electrical_Power_System_Architectures
4. Tine, M., et al. (2023). Design and modeling of a photovoltaic power system for nanosatellites. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 7 (2). <https://www.ijtsrd.com/papers/ijtsrd99841>
5. Lemmassi, A., Derouich, A., Hanafi, A., Byou, A., Benmessaoud, M., & El Ouanjli, N. (2024). A low-cost MPPT for triple-junction solar cells in nanosatellites: Comparative study of P&O and INC algorithms. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100447>
6. Alahmadi, A., et al. (2024). Efficient energy conversion methods in CubeSat electrical power systems. *Aerospace*, 11(11), 920. <https://doi.org/10.3390/aerospace11110920>
7. Hoseini, S. S., et al. (2022). A machine learning-based approach for optimizing energy consumption of Earth-observing nanosatellites. *Advances in Space Research*, 69 (1). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.09.015>
8. Bandyopadhyay, S., et al. (2021). Dynamic resource and payload allocation in small satellite constellations. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.G005123>
9. Amini, R., et al. (2023). Energy-efficient onboard computing algorithms for CubeSat systems in low Earth orbit. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 38 (4). <https://ieeexplore.ieee.org/document/10054321>

10. Wang, J., et al. (2024). Artificial intelligence-based power prediction and onboard energy optimization for nanosatellites. *Acta Astronautica*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.11.012>
11. Saeed, N., et al. (2020). Power optimization in CubeSat communication systems: A review of emerging technologies and opportunities. *IEEE Access*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9091123>
12. Chugh, S., et al. (2022). Modern methods for energy balance optimization in small spacecraft payload scheduling. *Space Policy*, 61, 101492. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2022.101492>
13. Kuo, C. L., et al. (2024). Adaptive task scheduling algorithm for power-efficient onboard computing in small satellites. *Journal of Spacecraft and Rockets*. <https://doi.org/10.2514/1.A35821>
14. Zhang, Y., et al. (2023). Energy-optimized routing and data transmission strategies for low Earth orbit satellite constellations. *Satellite Communications and Networking*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10123456>
15. Li, X., & Wang, H. (2025). Deep learning for CubeSat payload management: Balancing energy efficiency and performance. *Expert Systems with Applications*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.122000>
16. Pignatti, G., et al. (2022). Autonomous intelligent energy management systems in small spacecraft onboard systems. *Aerospace Science and Technology*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107612>

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ И БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ МАЛЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ НА НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ

***Аннотация.** Малые космические аппараты, особенно наноспутники типа CubeSat, часто сталкиваются с проблемой поддержания энергетического баланса из-за ограниченных размеров и малой мощности источников энергии. Основными преимуществами таких аппаратов являются их относительно низкая стоимость, быстрая разработка и возможность проведения научных исследований и технологических испытаний. Однако их небольшой размер и масса накладывают строгие ограничения на систему энергоснабжения. В связи с этим эффективное использование энергии считается одной из основных инженерных задач при проектировании и эксплуатации малых спутников.*

В данной статье анализируются современные методы снижения энергопотребления полезной нагрузки и бортового комплекса управления малых спутников, функционирующих на низкой околоземной орбите. Сначала рассматриваются конструктивные особенности малых космических аппаратов, их основные системы и энергетический баланс. Кроме того, анализируются основные факторы, влияющие на структуру энергопотребления, включая орбитальные условия, эффективность солнечных панелей и характеристики аккумуляторных систем. Затем описываются методы экономии энергии полезных нагрузок, таких как оптические камеры, радиомодули связи и различные научные сенсоры. К этим методам относятся применение эффективных алгоритмов обработки данных, периодическая активация устройств, использование режимов низкого энергопотребления и внедрение энергоэффективных электронных компонентов.

Также рассматриваются энергоэффективные архитектуры бортовых систем управления, возможности применения микроконтроллеров и специализированных процессоров. Обсуждаются последние технологические новшества в системах энергоснабжения, интеллектуальные алгоритмы управления энергией и методы динамического распределения мощности. На основе данных реальных проектов CubeSat приводятся практические примеры оптимизации энергии. Кроме того, с помощью

сравнительных таблиц анализируются характеристики различных технических решений и даются предложения по повышению энергоэффективности малых спутников в будущем.

Ключевые слова: малые космические аппараты, CubeSat, оптимизация энергопотребления, полезная нагрузка, бортовая система управления, система электропитания, энергоэффективность, низкая околоземная орбита.

MODERN APPROACHES TO OPTIMIZING THE PAYLOAD AND ENERGY CONSUMPTION OF THE ONBOARD COMPLEX FOR CONTROLLING SMALL SPACECRAFT IN LOW EARTH ORBITS

Abstract. Small spacecraft, especially CubeSat-type nanosatellites, often face the problem of maintaining an energy balance due to their limited size and low power sources. The main advantages of such spacecraft are their relatively low cost, rapid development, and suitability for conducting scientific research and technological experiments. However, their small size and mass impose strict limitations on the power supply system. In this regard, efficient use of energy is considered one of the main engineering tasks in the design and operation of small satellites.

This article analyzes modern methods for reducing the energy consumption of payloads and onboard control complexes of small satellites operating in low Earth orbit. First, the structural features of small spacecraft, their main systems, and their energy balance are considered. In addition, the main factors affecting the structure of energy consumption are analyzed, including orbital conditions, the efficiency of solar panels, and the characteristics of battery systems.

Then, methods for saving energy in payloads such as optical cameras, radio communication modules, and various scientific sensors are described. These methods include the use of efficient data processing algorithms, periodic activation of devices, the use of low-power operating modes, and the introduction of energy-efficient electronic components.

Energy-efficient architectures of onboard control systems, as well as the possibilities of using microcontrollers and specialized processors, are also considered. The latest technological innovations in power supply systems, intelligent energy management algorithms, and dynamic power distribution methods are discussed. Based on data from real CubeSat projects, practical examples of energy optimization are presented. In addition, comparative tables are used to analyze the characteristics of various technical solutions and to propose recommendations for improving the energy efficiency of small satellites in the future.

Keywords: small spacecraft, CubeSat, energy consumption optimization, payload, onboard control system, electrical power system, energy efficiency, low Earth orbit.

Авторлар туралы мәлімет

Саурбекова Амина Бақытбекқызы	Магистр, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: a.saurbekova@aes.kz
Ғұсман Әнел Сейтжанқызы	Магистр, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: a.gusman@aes.kz

Сведение об авторах

Саурбекова Амина Бақытбекқызы	Магистр, Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Алматы, Казахстан, E-mail: a.saurbekova@aes.kz
Ғұсман Әнел Сейтжанқызы	Магистр, Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Алматы, Казахстан, E-mail: a.gusman@aes.kz

Information about the authors

Saurbekova Amina Bakytbekkyzy	Master, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.saurbekova@aes.kz
Gusman Anel Seitzhankyzy	Master, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.gusman@aes.kz



ӘУЕ КӨЛІГІ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ВОЗДУШНЫЙ ТРАНСПОРТ И ТЕХНОЛОГИИ
AIR TRANSPORT AND TECHNOLOGY

UDC 81'33:656.7

IRSTI 73.37.01; 16.21.33

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_4

A. Koshekov^{1*}, Y. Kuanov¹

¹Civil Aviation Academy, Almaty, Kazakhstan

*E-mail: a.k.koshekov@gmail.com

DIGITAL TRANSFORMATION OF PROFESSIONAL AVIATION
MULTILINGUAL COMMUNICATIONS: A CORPUS-BASED STUDY

Abstract. *Digital transformation is influencing linguistic communication within the aviation industry; however, linguistic data remains limited. This study examines these changes based on 120 publicly available trilingual texts related to the aviation sector, comparing two time periods: 2018–2019 and 2024–2025. Preprocessing revealed cross-linguistic similarities. Text processing was carried out using a rule-based, Unicode-aware pipeline. Lexical richness was assessed using the MATTR-50 metric, while sentence length and digital terminology were analyzed via five conceptual categories and document-level variance analysis. Independent sample assessment involved Mann-Whitney U-tests with the Holm correction applied across the entire text. Variance analysis of terminology was conducted using Fisher's tests. The results indicate that sentence length decreased in both Russian and English—though the changes remained statistically significant after the Holm correction—whereas no changes were observed in Kazakh. While digital terminology was present in the earlier period, modern terms place greater emphasis on digital concepts such as AI, modeling, and learning.*

Keywords: *digital transformation, aviation discourse, multilingual corpus, digital aviation terminology, professional standardization.*

Introduction.

The digital transformation of the aviation industry represents a modern approach to the advancement of scientific research. Currently, the implementation of digital systems involves the use of AI, modeling, and decision-support tools across virtually all critical aspects of aviation [1]. These changes are transforming not only the technological processes themselves but also the specialized discourse through the description, regulation, training, and coordination of professional activities. This study examines these linguistic shifts as a consequence of the industry's intensive digitalization.

The aviation industry is one of the most suitable fields for such research, given that professional communication within it is standardized and multilingual. The international aviation environment encompasses shared concepts, globally used abbreviations, and regulated terminology. English serves as the language of international aviation communication, establishing requirements for safety, precision, brevity, and mutual understanding [2]. The International Civil Aviation Organization (ICAO) mandates a high level of English proficiency for flight crews and air traffic controllers [3]. Corpus-based studies of aviation English reveal specific functional and linguistic characteristics, as well as a procedural function [4].

However, aviation communication is not limited to radio exchanges. Professional communication also encompasses news, safety-related messages, aeronautical documentation,

regulatory documents, and educational matters. Regarding adherence to national standards, most English-language terms are adopted through loanwords, abbreviations, and linguistic adaptation. A study conducted in the Republic of Kazakhstan on the interplay of trilingual terminology revealed that establishing equivalence and standardization across these languages is challenging [5].

Consequently, Kazakhstan offers a convenient multilingual environment for professional aviation communication. Kazakh and Russian serve as the languages of national professional communication, while English is used for professional training, radio communication, and global terminology. National regulations permit trilingual radio communication. This linguistic configuration creates an environment in which the same process can be represented using different linguistic structures [6].

Most previous studies have focused primarily on the use of aviation English, radiotelephony phraseology, proficiency assessment, training strategies, and terminology. For instance, Bieswanger (2016) identifies specialized aviation registers in his work [7], while Ishihara and Prado (2021) highlight English as a language critical to safety [8]. Subsequently, the research focus shifted toward the study of specialized vocabulary, the development of specific practical tasks, and the analysis of multilingual document structures. Drayton and Coxhead (2023) demonstrated the importance of aviation vocabulary in enhancing safety systems through language training methodologies [9]. Pacheco et al. (2023) showed the feasibility of teaching aviation English using authentic corpora and outlined the limitations involved in compiling such corpora [10]. Carvalho et al. (2023) examined corpus-based methods through the study of multilingual documentation in the context of lexicographical and professional training [11]. Rigaud Peixoto et al. (2023) illustrated how aviation terminology can differ between institutional and specialized literature [12].

A review of the literature relevant to this study reveals a specific gap in knowledge: a lack of corpora that adequately reflect the growing role of digitalization within the multilingual aviation environment. This article addresses that gap, recognizing that digital transformation entails more than merely an increase in the frequency of these terms in texts. The aviation sector was already high-tech prior to the widespread adoption of artificial intelligence; early studies examined automated air traffic control systems, electronic navigation databases, cybersecurity measures, and decision-support systems. Contemporary developments are characterized by the reorientation of these technologies toward the use of artificial intelligence.

Another issue addressed in this article is the use of direct translation—specifically, identical identifiers—on the multilingual websites of official bodies. Analyzing such texts can result in an inflated measure of interlingual similarity. To address this challenge, the study proposes distinguishing between the diachronic analysis of a single language and descriptive methods of cross-linguistic comparison, while also incorporating a check for dependencies between identifiers and events.

The aim of this study is to identify and quantify diachronic changes in trilingual aviation discourse - specifically those linked to the digital transformation of the aviation industry at the institutional level. To achieve this aim, the researchers address the following objectives:

1. Assessing lexical and structural changes characteristic of institutional aviation discourse across two time periods: 2018–2019 and 2024–2025.
2. Assessing changes in the distribution of digital aviation terminology and technical concept groups for each language.
3. Assessing structural and terminological trends within the trilingual corpora.
4. Assessing indicators of the international standardization of aviation terminology within institutional trilingual discourse.

This study combines an analysis of diachronic structural indicators with an assessment of the variance of concept groups, incorporating controls for multiple comparisons and group

variance. To this end, it employs multiple comparison controls and examines dependencies influenced by translation quality and specific events.

Materials and research methods.

The study employs a comparative diachronic corpus analysis method. The research material consists of texts related to professional aviation activities from two time periods: 2018-2019 and 2024-2025. These periods were selected to reflect the onset of the industry's digital transformation and its current stage of development. The texts were compiled into three language datasets: KZ, RU, and EN. Based on this design, six sub-corpora were created: KZ-1, KZ-2, RU-1, RU-2, EN-1, and EN-2. The final collection comprises 120 aviation articles - specifically, 20 articles per sub-corpus. The total size of the corpus is determined as follows:

$$N = L \times P \times C \times n, \quad (1)$$

where L is the number of languages, P represents time intervals, C denotes thematic categories, and n is the number of documents per category.

The target metric is the number of documents rather than the volume of text. This is primarily due to the fact that the institutional texts are limited to corporate news or professional informational updates; consequently, word count is treated merely as an empirical characteristic of the corpus, while statistical analysis relies on metrics calculated for each individual document.

The dataset was sourced from the public archives of RSE "Kazaeronavigatsia." A single information source was deliberately chosen to ensure a unified publication environment, thereby eliminating the influence of varying editorial policies across different institutional bodies. This approach also facilitated the balancing of language samples based on temporal and thematic criteria. Nevertheless, the results obtained cannot be automatically generalized to the entire spectrum of aviation communication in Kazakhstan.

To mitigate the impact of thematic variations, the composition of each sub-corpus was balanced across four thematic categories: air traffic management and navigation; flight safety and regulatory compliance; professional training; and digital aviation technologies. Five documents were selected for each category, resulting in a total of 20 texts per time period and language.

Corpus quality assessment was conducted via a two-stage verification process. In the first stage, parallel records sharing identical identifiers were identified and marked by comparing identifiers across languages. The second stage involved a manual review of events; this helped identify events belonging to the specified time period that nonetheless had unique identifiers for each language. Thus, it can be concluded that identical identifiers do not equate to statistical data independence.

Due to the parallelism of events across language samples, direct statistical tests could not be employed in the final analysis. The unit of inference in the model is the document, and statistical analysis is based on comparing early and late periods for each sub-corpus. Convergences and divergences are assessed descriptively using models of direction, magnitude, and scope.

Articles were stripped of non-textual page elements, and a deterministic rule pipeline was applied to them. A token was defined as a contiguous sequence of letters and digits, preserving hyphens and apostrophes, though individual punctuation marks were removed. Sentence boundaries were determined by terminal punctuation marks. A unified set of rules was applied to all three languages to avoid dependencies on inconsistent language-specific taggers or morphological analyzers. Lexical diversity was assessed using the Moving-Average Type-Token Ratio (MATTR), a metric less sensitive to text length than traditional measures [13]. MATTR calculations were based on case-insensitive word surface forms, using a 50-token window and a step size of one token.

$$TTR_i = \frac{V_i}{w}. \quad (2)$$

The final MATTR value is calculated as follows:

$$MATTR_{50} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{V_i}{50}. \quad (3)$$

If a document's length fell below this threshold, the type-to-token ratio calculated for the entire sequence was used for segmentation. This rule applies across the entire range of languages. Average length is calculated as the ratio of the number of tokens to the total number of segmented sentences. Surface word forms are used as lemmas to avoid inconsistencies in lemmatization quality.

Given the morphological structure of the languages, MATTR values were interpreted with caution. For instance, the nature of Kazakh morphology can lead to increased variation in surface forms. Consequently, conclusions are drawn based on diachronic changes within a single language, rather than by comparing MATTR scores across languages.

Statistical metrics were calculated at both the document and sub-corpus levels. For each level, MATTR-50 values and average sentence lengths were compared using the Mann-Whitney test. Effect size was determined via rank-biserial correlation, noting the observed direction of change across the two time periods. Result robustness was verified using the Holm correction. To ensure model transparency, p-values adjusted by the Holm correction were used.

An analysis of terminological variance compared the proportions of documents present in the early and late periods for each language set using Fisher's tests. In the analysis of concept families, no p-values exceeding 0.05 were observed; consequently, the findings are interpreted as descriptive shifts in terminology. Direct Kruskal-Wallis tests were excluded from the final analysis because preliminary results indicated partial cross-linguistic dependency.

Results and their discussions

The experiment is built around a data set including 120 professional aviation texts taken from the official resource of the RSE “Kazaeronavigatsiya”. The six sub-corpora are balanced and have the same number of documents, as well as thematic composition. Preliminary analysis showed partial cross-language parallelism. As a result, the conclusions are limited to the framework of intralingual diachronic comparison.

As a result of the tokenization, the data set is presented in Table 1. It also presents the main structural indicators: MATTR-50 and the results of the Mann-Whitney test (without corrections) for each of the subcorpora. After introducing the Holm correction into the model, the parameters did not retain statistical significance. As a result, the data obtained indicate a change in lexical diversity within the subcorpora. The values of the MATTR indicator do not reflect the large lexical diversity of the subcorpora due to different morphological structures.

Table 1 - Structural characteristics of subcorpora

Language	Period	Tokens	MATTR-50	Mean sentence length
English	2018-2019	4 266	0.740	29.91
English	2024-2025	5 009	0.758	24.90
Russian	2018-2019	3 301	0.886	27.19
Russian	2024-2025	4 821	0.896	19.93
Kazakh	2018-2019	1 715	0.903	18.03
Kazakh	2024-2025	2 578	0.915	16.90

Figure 1 illustrates the shift in the directions of diachronic changes.

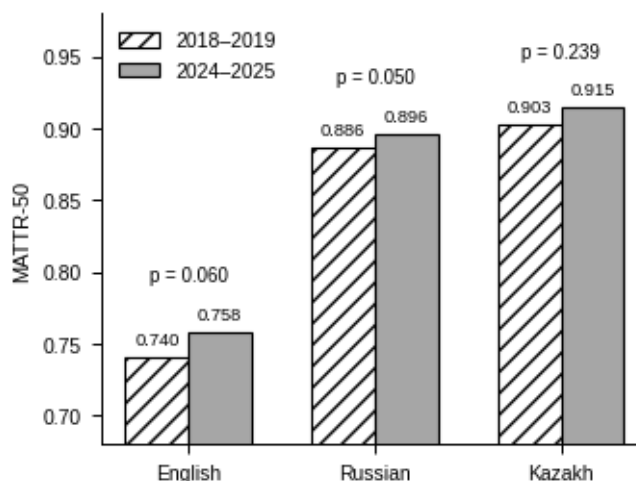


Figure 1 – Diachronic variation in MATTR-50 for multilanguage aviation discourse

MATTR-50 shows an increase across all language corpora. However, it is worth noting that the magnitude of change and the statistical significance vary for each of them. For the Russian language, the p-value is quite close to the standard threshold, whereas for the other languages, the results remained statistically insignificant. Corpus-based studies demonstrate that English possesses a specialized register characterized by specific lexical, functional, and discourse features. This study extends that approach by moving beyond the established research questions surrounding radiocommunication, thereby allowing the structural dynamics of institutional texts to be measured as well.

The most notable change concerns sentence length. For instance, in English, the figure stood at 29.91 words in 2018–2019 but dropped to 24.9 words in the second period. Russian showed a more substantial shift, with the average length falling from 27.19 to 19.93 words, while Kazakh exhibited only minor changes, moving from 18.03 to 16.9 words. Table 2 presents these changes, incorporating additional statistical analysis.

Table 2 – Structural characteristics of subcorpora

Language	Indicator	U-mean	Raw p	Holm p	r_{rb}	Interpretation
English	MATTR-50	130.0	0.060	0.212	0.350	Increase, not robust
English	Mean sentence length	275.5	0.042	0.212	0.378	Decrease, nominal only
Russian	MATTR-50	127.0	0.050	0.212	0.365	Increase, not robust
Russian	Mean sentence length	314.0	0.002	0.013	0.570	Decrease, robust
Kazakh	MATTR-50	156.0	0.239	0.479	0.220	Increase, not significant
Kazakh	Mean sentence length	182.5	0.646	0.646	0.088	Decrease, not significant

Applying the Holm correction affects the scope of the conclusions drawn. The effect of sentence length remains significant for Russian but not for English. The MATTR result for Russian is nominally close to 0.05. Thus, the statistical results are primarily linked to changes in sentence

length in Russian; a similar trend with nominal statistical significance is observed for English, whereas the indicator remains stable for Kazakh.

This shift in sentence structure aligns with the current trend toward brevity in communication; however, the diachronic nature of the study does not account for technological causal factors. Based on the document analysis, it can be concluded that aviation discourse prioritizes precision, clarity, and conciseness. Consequently, the observed linguistic reductions can be interpreted as language changes driven by the extensive adoption of digital technologies. Diachronic changes in sentence length for each corpus are shown in Figure 2.

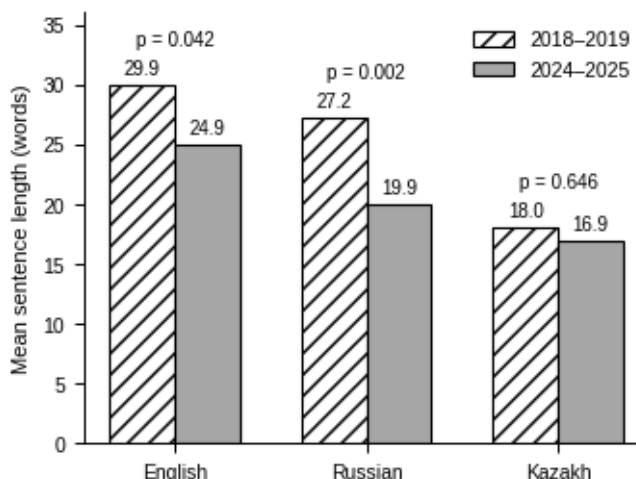


Figure 2 – Mean sentence length for multilanguage aviation discourse

The authors do not perform a final comparative analysis, as partial parallelism was identified during the preprocessing stage. In the descriptive experiment, the sub-corpora retain their initial metrics and exhibit distinct diachronic trajectories. Russian demonstrates a pronounced and consistent trend toward compression; English shows a less distinct direction of change; and Kazakh maintains a stable profile. These differences justify an interpretation based on "selective standardization."

The initial hypothesis regarding the impact of digital transformation on lexical frequency was not confirmed by the experiment. Such terminology was already in widespread use as early as 2018–2019. Aviation English discourse had previously addressed terms such as "automated control systems" and "software modernization." Consequently, digital transformation is understood not as a shift between discourses, but rather as a redistribution and diversification of technologies.

To determine specific characteristics, the input distribution was divided into five conceptual groups. Figure 3 illustrates the distribution of these groups across the sub-corpora, accounting for language-specific features and timeframes.

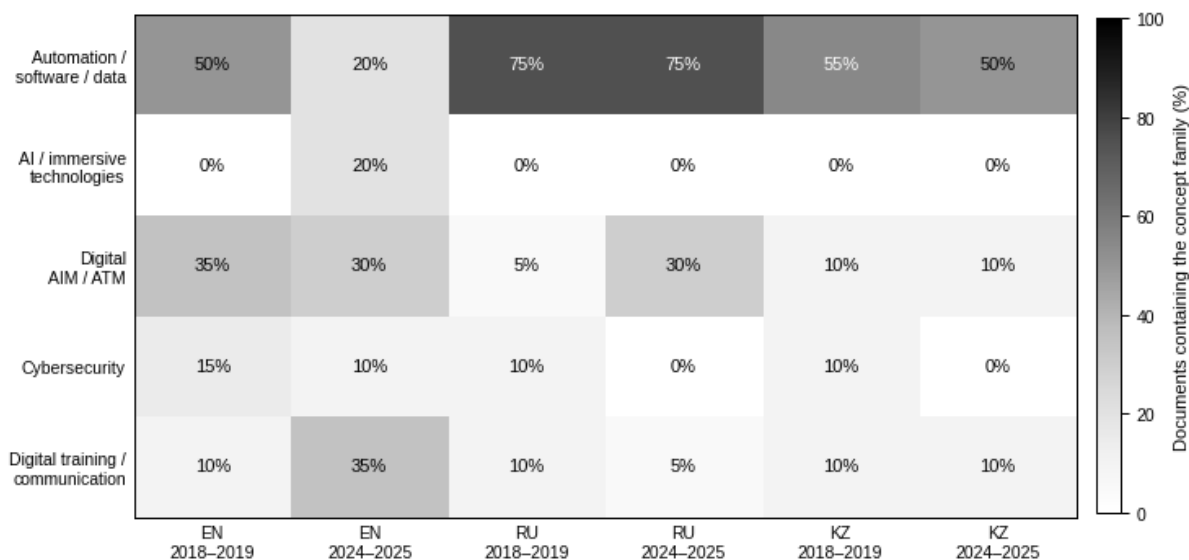


Figure 3 – Document coverage of aviation digital concepts

This visualization demonstrates the early integration of digital concepts into the professional aviation context - for instance, through the application of automation, software, and digital air navigation concepts. Changes in the sub-corpora are presented in Table 3.

Table 3 – Document coverage of aviation concepts

Language	Concept family	2018-19, %	2024-25, %	Change, pp
English	Automation/software/data	50	20	-30
English	AI/immersive technologies	0	20	+20
English	Digital AIM/ATM	35	30	-5
English	Digital training/communication	10	35	+25
Russian	Automation/software/data	75	75	0
Russian	AI/immersive technologies	0	0	0
Russian	Digital AIM/ATM	5	30	+25
Russian	Digital training/communication	10	5	-5
Kazakh	Automation/software/data	55	50	-5
Kazakh	AI/immersive technologies	0	0	0
Kazakh	Digital AIM/ATM	10	10	0
Kazakh	Digital training/communication	10	10	0

The changes shown in Table 3 do not reach the level of statistical significance according to Fisher's test. Consequently, such terminological shifts should be viewed as descriptive variations in usage rather than as changes in specific details.

One such example is the following shift in terminology: in 2024, articles discussing the acquisition of a new simulator use the term "pseudo-pilot" instead of "artificial intelligence." Materials regarding participation in the Airspace World 2024 conference highlight the transformation of the aviation industry through the application of AI and the Skyline-X platform. Professional training utilizing AI technologies incorporates 3D modeling and next-generation simulator systems.

An analysis of the English-language corpus suggests a shift from "digital infrastructure" to "AI." However, the analysis using Fisher's test yielded statistically insignificant results, indicating

a descriptive trend rather than a confirmed shift. This pattern aligns well with recent corpus-based linguistic studies, which demonstrate that technical vocabulary and linguistic data play a pivotal role in training and testing within the aviation sector [14].

An analysis of the Russian language corpus reveals a different picture. Documents concerning automation, software, and data processing account for 75% of the total volume across both time periods, while the scope of digital technology application has expanded from 5% to 30%. Fisher's p-value was 0.091; although this figure did not reach the generally accepted threshold of significance, it points to important changes that warrant verification using a larger language corpus.

The developed model demonstrates the increasing integration of digital technologies into air navigation processes. Such integration is viewed as a form of auxiliary information system. A prime example is Performance-Based Navigation (PBN), which plays a crucial role in the digital transformation of air navigation in Kazakhstan; this involves the use of satellite navigation and the modernization of airspace infrastructure. Thus, the transformation is characterized by a shift from mere digital infrastructure to aviation operations that integrate digital technologies.

The analysis conducted in this study highlights parallel processes in the standardization of international terminology. Various terms and acronyms—such as ICAO, ATM, ATC, and PBN—are increasingly being used in professional discourse within national languages. Research carried out in Kazakhstan demonstrates a correlation between international and national standards and the translated professional terminology [15].

The results obtained in this study do not demonstrate uniformity across linguistic constructs. Although the dataset exhibits signs of cross-linguistic dependency, no statistical analysis of the differences between linguistic distributions was performed. Instead, the study compares the directions and magnitudes of changes identified through diachronic analysis.

The MATTR metric shows an increase across all sub-corpora. This observation aligns with previous studies of aviation communication—though those studies took context into account [16]. The findings also resonate with research on multilingual corpora, where a shared technical domain fosters terminological standardization while respecting language-specific characteristics [11, 12]. The heterogeneous nature of these changes is illustrated in Figure 4.

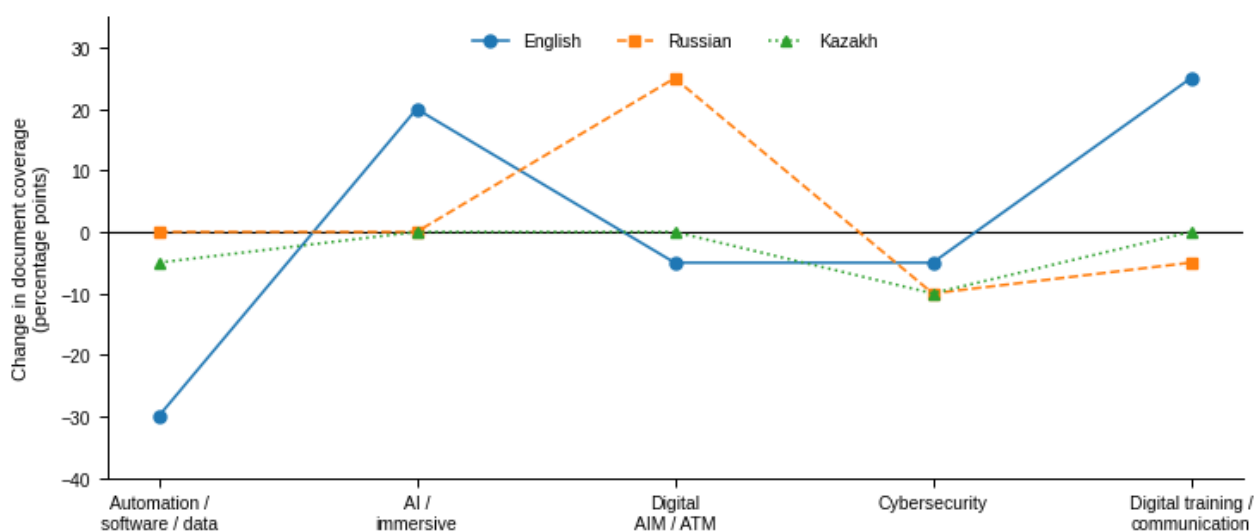


Figure 4 – Diachronic changes in documents

English shows the most pronounced shift toward AI technologies compared to traditional concepts. In Russian, the scope of topics related to digital ATM systems has expanded, whereas Kazakh demonstrates stability across all concept groups. This asymmetry serves as further evidence against the hypothesis of multilingual diversity.

In conclusion, selective convergence—viewed from a descriptive perspective—reflects a

combination of evolving trends and professional context. However, it is worth noting that the languages examined follow similar trajectories. Based on these results and experience, one can conclude that while international standards establish common benchmarks, their linguistic implementation remains language-specific.

Conclusion

The study examined diachronic changes in institutional literature in three languages actively used in Kazakhstan. The reviewed literature is divided into two time periods 2018-19 and 2024-25 for comparative analysis. The findings show how digital transformation is selectively influencing changes in aviation discourse. The most significant result was a reduction in the length of sentences in Russian. The English language has the same tendencies, and the Kazakh language remains stable in this regard. Lexical diversity improves description in all three languages, but the overall language pattern remains statistically significant.

Analysis of language terminology showed that digital transformation is considered as a redistribution of concepts, and not as digital vocabulary. In the texts of the first time period, terms associated mainly with automation are used, and modern discourse is associated with the integration of artificial intelligence terminology. General international terminology has standardization of concepts taking into account the specifics of linguistic discourse.

The proposed study allows us to expand corpus research in the aviation industry. They often involve learning radio communication and aviation English. This work also shows the importance of separating direct translations from the main comparison of the corpus in an interlingual environment. In the future, work will be carried out to expand the data array. There will also be a detailed study of the borrowing process, phraseology and human-machine interaction.

Funding

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP23490578 “Development of linguistic support and mobile application for a Kazakh-English-Russian thesaurus-type dictionary of modern aviation terms regulated by ICAO, EASA, IATA standards”).

References

1. Abu Talib, M., Nasir, Q., Dakalbab, F., & Saud, H. (2025). Future Aviation Jobs: The Role of Technology in Shaping Skills and Competencies. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 11(2), 100517. DOI: 10.1016/j.joitmc.2025.100517.
2. Kim, H. (2026). Aviation English as a Global Lingua Franca. DOI: 10.1017/9781009660785
3. ICAO. Language proficiency. <https://www.icao.int/operational-safety/language-proficiency>.
4. Zhao, W. (2023). A corpus-based study on aviation English from the perspective of systemic functional linguistics. *Discourse & Communication*, 17(5), 630–661. DOI: 10.1177/17504813231171644.
5. Zharkynbekova, S., Galiyeva, B., Ayupova, G., Bekova, M., & Shakhputova, Z. (2026). Language as a Value Category in Kazakhstan's Multilingualism: A Sociolinguistic Analysis of Ethnolinguistic Identity and Language Attitudes Among Different Population Groups. *International Journal of Bilingualism*. DOI: 10.1177/13670069261462817.
6. Karimova, A., Zhumataeva, E., Baigozhina, Z., & Akizhanova, D. (2026). Foreign Language Learning Environment and Communicative Competence Development in Kazakhstan. *Education Sciences*, 16(2), 298. DOI: 10.3390/educsci16020298.
7. Bieswanger, M. (2026). World Englishes, Applied Linguistics, and Air Traffic Control Communication. *World Englishes*. DOI: 10.1111/weng.70016.

8. Ishihara, N., & Prado, M. (2021). The Negotiation of Meaning in Aviation English as a Lingua Franca: A Corpus-Informed Discursive Approach. *The Modern Language Journal*, 105(3), 639–654. DOI: 10.1111/modl.12718.
9. Drayton, J. F., & Coxhead, A. (2022). Plain Language or Anything But? *Journal of Aviation/Aerospace Education & Research*. DOI: 10.15394/jaaer.2022.1908.
10. Pacheco, A., & Tales Figueiredo Silva. (2024). The Challenges of Pilot Language Training for Effective Aeronautical Communications in Multicultural Contexts. *Journal of Aviation/Aerospace Education and Research/The Journal of Aviation/Aerospace Education & Research*, 33(2). DOI: 10.58940/2329-258x.2011.
11. Carvalho, M., Terenzi, D., Tosqui-Lucks, P., & Zhou, Z. (2023). LANGUAGE OF AIRCRAFT DOCUMENTATION: USING A MULTILINGUAL CORPUS IN COLLABORATIVE WORK IN LEXICOGRAPHY AND PEDAGOGY. *Journal of Teaching English for Specific and Academic Purposes/The Journal of Teaching English for Specific and Academic Purposes*, 041–041. DOI: 10.22190/jtesap230103005c.
12. Rigaud Peixoto, R. A. J. (2023). The interface between specialized translation and institutional translation: a selection of candidate terms validated by Aeronautical Meteorology corpora. *Applied Corpus Linguistics*, 100051. DOI: 10.1016/j.acorp.2023.100051.
13. Allkivi, K. (2026). Towards interpretable models for language proficiency assessment: Predicting the CEFR level of Estonian learner texts. *Journal of Responsible Technology*, 25, 100162. DOI: 10.1016/j.jrt.2026.100162.
14. Muawanah, U., Marini, A., & Sarifah, I. (2024). The interconnection between digital literacy, artificial intelligence, and the use of E-learning applications in enhancing the sustainability of Regional Languages: Evidence from Indonesia. *Social Sciences & Humanities Open*, 10, 101169. DOI: 10.1016/j.ssaho.2024.101169.
15. Anayatova, R., Tulekova, G., Koshekov, A., Koshekov, K., & Levchenko, N. (2024). Professional and Communicative Competences in Using Linguistic Aspects of the State Language in the Sphere of Civil Aviation of Kazakhstan. *Psycholinguistics*, 36(2), 63–89. DOI: 10.31470/2309-1797-2024-36-2-63-89.
16. Yalvaç, G. (2026). A bibliometric analysis of airline service quality. *Social Sciences & Humanities Open*, 13, 102417. DOI: 10.1016/j.ssaho.2025.102417.

КӘСІБИ АВИАЦИЯНЫҢ КӨП ТІЛДІ БАЙЛАНЫСТАРЫНЫҢ ЦИФРЛЫҚ ТРАНСФОРМАЦИЯСЫ: КОРПУС НЕГІЗІНДЕГІ ЗЕРТТЕУ

***Аңдатпа.** Цифрлық трансформация авиация саласындағы тілдік коммуникацияға әсер етуде; дегенмен, тілдік деректер шектеулі болып қала береді. Бұл зерттеу авиация саласына қатысты 120 жалпыға қолжетімді үш тілді мәтінге сүйене отырып, екі уақыт кезеңін салыстыра отырып, осы өзгерістерді зерттейді: 2018–2019 және 2024–2025. Алдын ала өңдеу тілдерінің ұқсастықтарды анықтады. Мәтінді өңдеу ережесі негізделген, Юникодты ескеретін құбырды пайдалану арқылы жүзеге асырылды. Лексикалық байлық MATTR-50 метрикасы арқылы бағаланды, ал сөйлем ұзындығы мен цифрлық терминология бес тұжырымдамалық санат және құжат деңгейіндегі дисперсиялық талдау арқылы талданды. Тәуелсіз үлгіні бағалауға Холм түзетуі бүкіл мәтінге қолданылған Манн-Уитни U-тестілері кірді. Терминологияның дисперсиялық талдауы Фишер тесттерін қолдану арқылы жүргізілді. Нәтижелер сөйлем ұзындығының орыс және ағылшын тілдерінде де азайғанын көрсетеді - дегенмен өзгерістер Холм түзетуінен кейін статистикалық тұрғыдан маңызды болып қалды - ал қазақ тілінде ешқандай өзгеріс байқалмады. Сандық терминология ертерек кезеңде болғанымен, қазіргі терминдер жасанды интеллект, модельдеу және оқыту сияқты сандық ұғымдарға көбірек мән береді.*

***Түйін сөздер:** сандық трансформация, авиациялық дискурс, көптілді корпус, сандық авиациялық терминология, кәсіби стандарттау.*

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ МНОГОЯЗЫЧНОЙ КОММУНИКАЦИИ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ АВИАЦИИ: КОРПУСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Аннотация. Цифровая трансформация оказывает влияние на языковую коммуникацию в авиационной отрасли; однако лингвистические данные остаются ограниченными. В данном исследовании изучаются эти изменения на основе 120 общедоступных трехязычных текстов, относящихся к авиационному сектору, с сравнением двух временных периодов: 2018–2019 и 2024–2025 гг. Предварительная обработка выявила межъязыковые сходства. Обработка текста проводилась с использованием основанного на правилах конвейера, учитывающего Unicode. Лексическое богатство оценивалось с помощью метрики MATTR-50, а длина предложений и цифровая терминология анализировались с помощью пяти концептуальных категорий и дисперсионного анализа на уровне документа. Независимая оценка выборки включала U-тесты Манна-Уитни с поправкой Холма, применяемой ко всему тексту. Дисперсионный анализ терминологии проводился с использованием тестов Фишера. Результаты показывают, что длина предложений уменьшилась как в русском, так и в английском языках — хотя изменения оставались статистически значимыми после поправки Холма, — тогда как в казахском языке изменений не наблюдалось. В то время как цифровая терминология присутствовала и в более ранний период, современные термины уделяют больше внимания цифровым понятиям, таким как ИИ, моделирование и обучение.

Ключевые слова: цифровая трансформация, авиационный дискурс, многоязычный корпус, цифровая авиационная терминология, профессиональная стандартизация.

Information about the authors

Koshekov Abay	PhD, Associate Professor, Department of Aviation Engineering and Technologies, Civil Aviation Academy, Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.k.koshekov@gmail.com
Kuanov Yerkanat	Master, Supervisor, Center for Scientific Achievements, Civil Aviation Academy, Almaty, Kazakhstan, E-mail: y.kuanov@agakaz.kz

Авторлар туралы мәлімет

Кошеков Абай Кайратович	PhD, «Азаматтық авиация академиясы» АҚ, «Авиациялық техника және технологиялар» кафедрасының ассоц. профессоры, Алматы, Қазақстан, E-mail: a.k.koshekov@gmail.com
Куанов Ерқанат Ерболұлы	Магистр, «Ғылыми жетістіктер» орталығының басшысы, Алматы, Қазақстан, E-mail: y.kuanov@agakaz.kz

Сведения об авторах

Кошеков Абай Кайратович	PhD, ассоц.профессор кафдеры «Авиационная техника и технологии» АО «Академия гражданской авиации» Алматы, Казахстан, E-mail: a.k.koshekov@gmail.com
Куанов Ерқанат Ерболұлы	Магистр, Руководитель «ЦНД», E-mail: y.kuanov@agakaz.kz



ЛОГИСТИКА, ТАСЫМАЛДАУДЫ ҰЙЫМДАСТЫРУ, КӨЛІКТЕГІ ҚАУІПСІЗДІК
ЛОГИСТИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, БЕЗОПАСНОСТЬ НА ТРАНСПОРТЕ
LOGISTICS, TRANSPORTATION ORGANIZATION, TRANSPORT SECURITY

ӘОЖ 625.096

ҒТАХА 73.29.17

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_5

Б.А. Аймагамбетова¹, О.Г. Киселёва^{1*}, Н.Г. Капезова²,
Г.М. Имашева¹, Н.А. Токмурзина¹

¹Сәтбаев Университеті, Алматы, Қазақстан

² Логистика және көлік академиясының Алматы колледжі, Алматы, Қазақстан

*E-mail: o.kisselyova@satbayev.university

**ҚОЗҒАЛЫС ҚАУІПСІЗДІГІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ЖҮК АҒЫНДАРЫНЫҢ
ӨСУІ КЕЗІНДЕ ТЕМІРЖОЛ ТАСЫМАЛДАУШЫСЫНЫҢ
ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУ**

Аңдатпа. Мақала теміржол тасымалдаушысының көлік жұмысының көлемін ұлғайту кезінде тасымалдау процесінің сенімділігін, үздіксіздігін және қауіпсіздігін сақтау қабілетін анықтайтын факторларды зерттеуге арналған. Зерттеудің өзектілігі тасымалдау көлемінің ұлғаюына, жүк айналымының өсуіне, тасымалдаудың орташа қашықтығының ұзаруына және транзиттік жүктеменің күшеюіне байланысты, бұл инфрақұрылымға, жылжымалы құрамға, диспетчерлік басқаруға, жөндеу базасына және қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз ету жүйесіне әсердің жоғарылауына әкеледі. Осы жағдайларда теміржол тасымалдаушысы қызметінің тұрақтылығын техникалық, инфрақұрылымдық, ұйымдастырушылық, кадрлық, қаржылық, цифрлық және сыртқы экономикалық факторлардың әсерінен тасымалдардың тұрақты орындалуын қамтамасыз ету қабілеті ретінде қарастырған жөн. Бұл ретте, жұмыста теміржол тасымалдаушысының тұрақтылығын тек пайдалану немесе экономикалық көрсеткіштер бойынша бағалау мүмкін естігі негізделген, өйткені көлік жұмысының ұлғаюы басқарушылық пен тәуекелдердің рұқсат етілген деңгейінің сақталуымен қатар жүруі керек. Әдістемелік негіз ретінде жүк ағындарының динамикасын бағалауды, тасымалдаудың орташа қашықтығын есептеуді, пайдалану жүктемесінің индексін анықтауды, транзиттік құрамдас бөлікті бағалауды, сондай-ақ қозғалыс қауіпсіздігінің меншікті тәуекелінің қажетті төмендеуін есептеуді қамтитын есептеу-талдамалық тәсіл ұсынылды. Бағалаудың түпкілікті нәтижесі тұрақтылықтың интегралды индексін анықтау болып табылады, оның мәні қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз ету бойынша бірқатар іс-шараларды әзірлеуге мүмкіндік береді. Тасымалдаушының интегралды тұрақтылығын шектейтін параметр ретінде қарастырылатын қозғалыс қауіпсіздігі коэффициентіне ерекше назар аударылады. Әдістеменің тәжірибелік маңыздылығы тасымалдаудың сенімділігін арттыруға, қозғалыс қауіпсіздігінің бұзылуының алдын алуға және қазіргі жағдайда теміржол тасымалдаушыларының тұрақты дамуын қамтамасыз етуге бағытталған басқару шешімдерін қабылдау үшін есептік көрсеткіштерді пайдалану мүмкіндігі болып табылады.

Түйін сөздер: теміржол тасымалдаушысы, тұрақтылық, жүк ағындары, қозғалыс қауіпсіздігі, пайдалану жүктемесі, меншікті тәуекел.

Кіріспе.

Мақаланың өзектілігі Қазақстанның көліктік-логистикалық жүйесінің тұрақтылығын қамтамасыз етуінде теміржол тасымалдаушыларының қарқынды өсуімен, әсіресе жүқағындарының өсу қарқынында, халықаралық транзиттің дамуы мен қозғалыс қауіпсіздігі талаптарының өсуімен анықталады. Қазақстан Республикасының теміржол көлігінде 2025 жылдың қаңтар-желтоқсан айларының қорытындысы бойынша 466,7 млн тонна жүк тасымалданды. Бұл 2024 жылға қарағанда 6,8% есеге жоғары, ал жүк ағыны 10,2% өсіп, 361,3 млрд т-км құрады [1].

Бұл көрсеткіштер теміржол жүйесіне жүктеменің күшеюін дәлелдейді және тасымалдау процесінің үзіліссіздігі мен қауіпсіздігіне әсер ететін факторлардың бағалануының қажеттілігін дәлелдейді. Қарастырылатын тақырыптың маңыздылығы Қазақстанның Еуропа мен Азия арасындағы транзитті торабы ретінде дамуымен байланысты. ҰК «Қазақстан темір жолы» мәліметтеріне сәйкес 2025 жылы транзитті тасымалдау 33 млн тоннаға жеткен, осы уақытта 2026 жылдың қаңтар-наурызында транзит қосымша 8 ден 9 млн тоннаға өсіп, ал контейнер тасымалы 6%-ға артты [2]. Транзитті ағындардың өсуі теміржол тасымалының тұрақтылығына талаптарын арттырады, себебі поезд қозғалысының бұзылуы, техникалық ақаулар, телімдердің жеткіліксіз өткізу қабілеті және технологиялық тәртібтердің бұзуы экономикалық шығындармен қозғалыс қауіпсіздігінің төмендеуіне әкелуі мүмкін. Теміржол көлігінің жұмыс жасауының заманауи шарттары тасымалдаушылардың тұрақтылығының жеке тәуекелдерді фрагменттік талдаудан жүйелі бағалауына ауысуды талап етеді. Теміржол тасымалдаушысы қызметінің тұрақтылығын техникалық, инфрақұрылымдық, ұйымдастырушылық, кадрлық, қаржылық, сандық және сыртқы экономикалық факторлардың әсерінде тасымалдауды тұрақты орындауын қамтамасыз ету қабілеті ретінде қарастыру қажет. Бұл жағдайда қозғалыс қауіпсіздігі тұрақтылықтың түйінді интегралдық көрсеткіші ретінде қызмет етеді, себебі техникалық қызмет етудің сапасын, инфрақұрылымның сенімділігін, қызметкерлердің кәсіби дайындығын, диспетчерлік басқарудың тиімділігін және тәуекел-менеджмент жүйесінің тиімділігін айқындайды. Сонымен қатар зерттеудің өзектілігі Қазақстанның теміржол құрылымының жаңғыру ауқымымен байтанысты. 2025 жылы 300 км теміржол телімі жарактандырылуы басталды. Бұл жаңа жолдардың құрылысымен тең, жеке бағыттарда өткізу қабілеті артуы күтіледі: Қызылжар – Сексеуіл телімінде 8 ден 25 поездға, Қандағаш-Тобыл телімінде 7 ден 25 поездға дейін.

Белгіленген жобалар тасымалдаушыларға жаңа мүмкіндіктер тудырады, бірақ тұрақтылықты бағалаудың әдістерін жетілдіру қажет, себебі қозғалыстың жиілігінің артуы инфрақұрылымның техникалық жағдайын, жылжымалы құрамды, бақылауды күшейтумен бірге қауіпсіздік талаптарын сақтауы қажет. Халықаралық статистика бойынша қозғалыс қауіпсіздігі теміржол саласының ең маңызды мәселесі болып қала береді. UIC деректері бойынша теміржол көлігіндегі ірі апаттардың саны үнемі өсуде, 2020 жылдан 2024 жылға дейін 1660 тан 2018 артты. Бұл бес жылдық кезеңде 21,5 % артуын, яғни тұрақты тенденциясының апаттар санының артуын көрсетеді [3]. Теміржол жүйесінің технологиясының дамуында да адами факторлармен, сыртқы ортамен өзара әрекеттесу, қозғалыс қарқындылығымен және инфрақұрылым жағдайымен байланысты сақталған тәуекелдермен қатынасады.

Еуропалық статистика да қауіпсіздікті үнемі бақылау қажеттілігін көрсетеді: 2024 жылы ЕО елдерінде 1 507 теміржол апаттары тіркелген, оның ішінде маңызды бөлігі өліммен аяқталған жағдайлардың айтарлықтай үлесі бейтаныс адамдардың жолдарда болуы және теміржол өткелдеріндегі оқиғалар болған [4]. Қозғалыс қауіпсіздігі тасымалдаушының техникалық құралдарымен ғана емес, ұйымдастыру, әрекеттік факторлар, инфрақұрылымдық және басқару факторлары арқылы да бағалануы тиіс екенін растайды.

Көлік саласын цифрландыру жағдайларында қозғалысты басқарудың, инфрақұрылым жайын бақылау мен тәуекелдердің алдын алуда интеллектуалды жүйесін ендіру арнайы орын алуда. Мысалы, Қазақстанның Қарағайлы-Көкпекті телімінде «АЙМАК RAIL» поездар қозғалысын реттеу жүйесі ендірілген, сонымен қатар өткізу қабілетін өсіруге және тасымалдау тиімділігін аррыруға бағытталған 247 км қашықтықтағы телімде спутникті байланыс жобасы іске асырылуда. Мұндай шешімдер теміржол тасымалының тұрақтылығын дәлірек, алдын алу мақсатында және деректері бағдарланған бағалауға негізін құрайды [5].

Сонымен, тақырыбтың өзектілігі орталық критеридің сапасы ретінде қауіпсіз қозғалысыты таңдауымен теміржол тасымалдаушыларының тұрақты қызметіне әсер ететін факторларды бағалауға жүйелі қатынасын жасау қажеттілігімен шартталған [6]. Зерттеудің ғылыми маңыздылығы тасымалдау көлемінің артуы, инфрақұрылымның жағдайы, жылжымалы құрамның сенімділігі, цифрандыру, кадрлық тәуекелдер, технологиялық үдерістерді басқару және қозғалыс қауіпсіздігі деңгейі арасындағы өзара байланысты кешенді түрде қарастыруға мүмкіндік беруінде болып табылады. Тәжірибелік маңыздылығы зерттеу нәтижелерін тасымалдау процесінің сенімділігін арттыру, апаттық жағдайлардың алдын алу, тәуекел менеджментті жетілдіру және қазіргі жағдайларда теміржол тасымалдаушыларының тұрақты дамуын қамтамасыз ету үшін қолдану мүмкіндігінде көрінеді.

Әдеби шолу. Ғылыми әдебиеттерде теміржол тасымалдаушыларының тұрақтылығы тек тасымалдау көлемін сақтау қабілеті ретінде ғана емес, сонымен қатар жүйенің ақаулардың алдын алу, бұзушылықтардың себептерін азайту және пойыздардың қауіпсіз қозғалысын сақтау қабілеті ретінде қарастырылуда [7]. Бұл тұрғыда N. Bešinović зерттеуі маңызды болып табылады, онда теміржол көлігі жүйелерінің тұрақтылығы сәтсіздіктердің салдарын бағалау, қалпына келтіру динамикасы және уақыт бойынша пайдалану көрсеткіштерінің өзгеруі арқылы ашылады. Автор көлік сұранысының артуы, желілердің күрделенуі және бұзушылықтардың көбеюі тұрақтылықты сандық өлшеуді қажет ететінін, соның ішінде кешігу, пойыздардың жойылуы, өткізу қабілеттілігі мен қызмет көрсету сапасын қалпына келтіруді талап ететінін атап көрсетеді [8]. Теміржол жүйелерінің қауіпсіздігін бағалауға V. Sangiorgio, A. M. Mangini және I. Precchiazzi айтарлықтай үлес қосты. Авторлар иерархиялық талдау әдісінің, оңтайландыру процедурасының және апаттың алдыңғы факторлары туралы деректердің үйлесіміне негізделген теміржол көлігі жүйесінің қауіпсіздік индексын ұсынды [9]. Олардың көзқарасының ерекшелігі-қауіпсіздік жеке индикатор ретінде емес, инфрақұрылымның жай-күйі, пойыз жабдықтарының техникалық жағдайы және басқару шешімдерінің өзара әрекеттесуі нәтижесінде қарастырылады. P. Rungskunroch, A. Jack және S. Kaewunruen жұмысында Байес қорытындысы, шешім ағашы және Петри үлгілері негізінде теміржол жүйелерінің қауіпсіздігін салыстырмалы бағалау тәсілі ұсынылды [10]. Зерттеу ұзақ мерзімді апаттық деректерге сүйенеді және тәуекелдерді талдау белгісіздікті, оқиғалардың жиілігін, салдардың ауырлығын, зардап шеккендердің санын және нақты теміржол желілерінің ерекшеліктерін ескеруі керек екенін көрсетеді. Тұрақтылықты зерттеудің заманауи аспектісі F. Restel-дің қозғалыс бұзылыстарындағы теміржол жүйесінің операциялық тұрақтылығын бағалауға арналған мақаласында келтірілген [11]. Автор тұрақтылықты дәстүрлі бағалау көбінесе желінің байланысын немесе учаскелердің өткізу қабілеттілігін талдаумен шектелетінін, бірақ теміржол тасымалдаушылары үшін бұл жеткіліксіз екенін атап өтті. Тасымалдау процесінің параметрлерін ескеру қажет: уақтылығы, кешігу ықтималдығы, жөнелтілген пойыздардың саны, ресурстармен қамтамасыз етілуі және жүйенің қозғалыс кестесін қалпына келтіру мүмкіндігі. Бұл тәсіл әсіресе тасымалдаушылар үшін өте маңызды, өйткені олардың қызметінің тұрақтылығы жүйенің ақауларға қаншалықты тез және қауіпсіз жауап беретініне тікелей байланысты. Жүк теміржол тасымалының тұрақтылығын бағалау тәсілдерінің дамуына H. Li, L. Qi, M. Wang және J.

Liю елеулі үлес қосты, олар белгісіздік, сыртқы бұзушылықтар және тасымалдау сенімділігіне қойылатын талаптардың өсуі жағдайында трансшекаралық жүк теміржол жүйелерінің тұрақтылығын қарастырды [12]. Зерттеу қызықты, өйткені тұрақтылық жүйенің қабілеттерінің екі тобы арқылы ашылады: проактивті, ақаулардың алдын алуға бағытталған және реактивті, бұзылулардан қалпына келтіруді қамтамасыз етеді. Бағалау үшін авторлар бұлыңғыр Байес желісіне негізделген модельді пайдаланады және көрсеткіштер ретінде теміржол учаскелерінің нақты, жоғалған және қалпына келтірілген өткізу қабілеттілігін пайдаланады. Теміржол тұрақтылығы жүйесіндегі қауіпсіздік аспектісін ашу үшін L. Szaciło, M. Jacyна, E. Szczepański және M. Izdebski авторларының жұмысын қосқан жөн, мұнда апаттардың себептерін, жекелеген оқиғалардың пайда болу ықтималдығын және тасымалдау процесінің бұзылуы кезінде пойыздардың ықтимал кідірістерін талдау негізінде жүк теміржол тасымалындағы тәуекелдерді бағалау тәсілі ұсынылған [13]. Зерттеудің ерекшелігі - жүк тасымалының қауіпсіздігі оқшауланбай, кешігулерді, қозғалыс кестесінің бұзылуын және ықтимал экономикалық шығындарды қоса алғанда, пайдалану салдарымен өзара байланысты қарастырылады.

Әдеби шолуда теміржол тасымалдаушылары қызметінің тұрақтылығын инфрақұрылымның сенімділігін, жылжымалы құрамның техникалық жай-күйін, қозғалысты басқару сапасын, тәуекел-менеджментті, кадрлық факторларды, цифрлық мониторингті және қозғалыс қауіпсіздігін біріктіретін кешенді сипаттама ретінде қарастырғананын көрсетеді.

Зерттеудің ғылыми жаңашылдығы – қозғалыс қауіпсіздігі бақылаудың жеке бағыты емес, тасымалдаушының тұрақтылығының негізгі интегралды өлшемі болып табылатын жүйелік тәсілді жасау. Осы тәсіл оқиғалар болған жағдайға дейін қауіпті факторларды анықтауға, басқару бойынша шешімдерді негіздеуге және жүк ағындарының өсуі мен көлік-логистикалық тізбектердің күрделенуі жағдайында теміржол тасымалының сенімділігін арттыруға мүмкіндік жасайды.

Зерттеу материалдары мен әдістері.

Дәстүрлі тәсілде көбінесе тасымалдаушының қызметі тасымалданған жүк көлемімен бағаланады қарағанда, ал берілген зерттеуде тұрақтылық тасымалдаушының тасымалдау процесін пайдалану жүктемесі артқан кезде қауіпсіз, үзіліссіз, басқарумен орындалатын тасымалдауды қамтамасыз етуіге қабілеттілігі қарастырылады. Зерттеудің әдіснамалық логикасы жүк ағынының өсуі өздігімен тасымалдаушы қызметінің оң нәтижесі ретінде қарастырылмайтынына негізделеді.

Тасымалдау көлемінің, жүк айналымы, транзитті ағындар, тасымалдаудың орташа қашықтығының артуы бір мезгілде инфрақұрылымға, жылжымалы құрамға, локомотив бригадасына, диспетчерлік басқаруға, жөндеу базасына және қозғалыс қауіпсіздігі жүйесіне жүктемені күшейтеді.

Сол себепті теміржол көлігінің тұрақтылығы екі өзара байланысқан процесстердің қатынасы арқылы бағалануы тиіс: пайдалану жүктемесінің арттыру және тасымалдаушының осы жүктемені ұйымдастыру, техникалық, инфрақұрылымдық шаралар арқылы теңестіру.

Әдіснамалық зерттеулер бірнеше өзара байланысқан есептеу блоктарын қамтиды:

- 1) Жұқағыны динамикасын бағалау;
- 2) Тасымалдаудың орташа қашықтығын есептеу;
- 3) Транзитті жүктемені анықтау;
- 4) Пайдалану жүктемесін пайдалану индексі есептеу;
- 5) Қозғалыс қауіпсіздігінің көрсеткіштерін бағалау;
- 6) Тасымалдаушының тұрақтылықтың интегралды индексі анықтау.

Зерттеудің бірінші кезеңінде жұқағыны мен көлік жұмысының динамикасын бағалау жүргізіледі. Бұл үшін талданатын кезеңдегі тасымалдау көлемі мен жүк айналымы көрсеткіштері пайдаланылады.

Егер ашық деректерде ағымды жылдың мәндері мен алдыңғы жылдағы өсу қарқыны көрсетілсе, алдыңғы кезеңдегі базалық мәндердің есебі келесі формуламен орындалады:

$$Q_0 = \frac{Q_1}{1 + g_Q}, \text{ млн т} \quad (1)$$

$$P_0 = \frac{P_1}{1 + g_P}, \text{ млрд т – км} \quad (2)$$

мұнда Q_0 – базалық кезеңде есепті тасымалдау көлемі;

Q_1 – ағымды кезеңде тасымалдау көлемі;

P_0 – базалық кезеңде есепті жүкайналымы;

P_1 – ағымды кезеңде жүк айналымы;

g_Q, g_P – сәйкесінше тасымалдау көлемі мен жүкайналымының өсу қарқыны.

Егер жүкайналымы тасымалдаудың физикалық көлемне қарағанда қарқынды өскен жағдайда, бұл тасымалдаудың орташа қашықтығының өсуін және тасымалдау қорын қарқынды пайдалануын көрсетеді.

Екінші кезеңде пайдалану жүктеменің маңызды индикаторы ретінде қызмет ететін тасымалдаудың орташа қашықтығы есептеледі және келесі формуламен есептеледі:

$$L = \frac{P}{Q} \times 1000, \text{ км} \quad (3)$$

Берілген көрсеткіштің артуы тасымалдаушының жүктің үлкен көлемін өңдеумен қатар, оның ұзақ маршруттарға жүруін қамтамасыз етуін білдіреді. Бұл жылжымалы құрамның техникалық дайындығына, инфрақұрылымның сенімділігіне, локомотив бригадасының жұмысын ұйымдастыру, қозғалыс қауіпсіздігін диспетчерлік реттеу мен бақылауға талаптарды арттырады.

Үшінші кезеңде транзитті жүктемені бағалау жүргізіледі, сондықтан транзитті тасымалдаудың жалпы тасымалдау қызметіндегі үлесін келесі формуламен анықтайды:

$$D_{\text{тр}} = \frac{Q_{\text{тр}}}{Q_{\text{жалпы}}} \times 100 \quad (4)$$

Транзит үлесі неғұрлым жоғары болған сайын, инфрақұрылымның өткізі қабілеті, көршілес теміржол әкімшіліктермен өзара әрекеттесуі, қозғалыс кестесін сақтау және қауіпсіздікті бұзудың алдын алу маңызы жоғары болады.

Төртінші кезеңде тасымалдау көлемі, жүк айналымы және тасымалдаудың орташа қашықтығы нәтижесінде тасымалдаушыға қаншалықты қысым артқанын көрсететін пайдалану жүктемесінің индексі құралады.

Пайдалану жүктемесінің индексі зерттеуде келесі формуламен анықталады:

$$I_{\text{п}} = 0,4I_Q + 0,4I_P + 0,2I_L \quad (5)$$

мұнда I_Q – тасымалдау көлемінің арту индексі;

I_P – жүкайналымы артуының индексі;

I_L – тасымалдаудың орташа қашықтығының арту индексі.

(5) формуладағы салмақ коэффициенттерінің мәндері пайдалану бойынша, қозғалыс қауіпсіздігі, тасымалдау инфрақұрылымы және тасымалдауды басқару мамандарының қатысуымен экспертті әдіспен нақтылауға болады.

Бесінші кезеңде тасымалдаушының қозғалыс қауіпсіздігінің көрсеткіштерін бағалау орындалады. Берілген кезеңде жүк айналымының артуымен қозғалыс қауіпсіздігіне қатысты нақты тәуекелдің қажетті деңгейін ұстап тұру қабілетін көрсететін талапын айқындауды, сонымен қатар пайдалану жүктемесі артқан шарттарында тасымалдаушының тәуекелдің рұқсатты деңгейін сақтайтын қабілетін көрсететін қозғалыс қауіпсіздігі коэффициентін есептеуді қамтиды.

Меншікті тәуекелдің қажетті төмендеуі келесі формула бойынша есептеледі:

$$R_{\text{төм}} = \left(1 - \frac{1}{I_p}\right) \times 100 \quad (6)$$

(6) формула жүк жұмысы артқанда қауіпсіздік жүйесінің қаншалықты күшеюін көрсетеді.

Мұндай қатынас қауіпсіздікті формалды бақылаудан тәуекелге бағдарланған басқару моделіне ауысуға мүмкіндік береді. Онда қауіпсіздік оқиғалардың болу фактісі бойынша ғана емес, тасымалдау жүктемесі артқан жағдайда тасымалдаушының тәуекелді болдырмау қабілеті бойынша да бағалайды.

Берілген зерттеуде қауіпсіздік бақылаудың жеке бағыты түрінде емес, тасымалдаушының тұрақтылығының шектеулі шарты түрінде қарастырылады.

Бұл тасымалдау көлемі артып, өндірістік көрсеткіштер жақсарған жағдайда да, қозғалыс қауіпсіздігінің көрсеткіштері төмендеген жағдайда тасымалдаушының қызметі тұрақты деп танылмайтынын білдіреді.

Қауіпсіз қозғалыс коэффициенті жалпы түрде келесі формуламен анықталады:

$$K_{\text{ққ}} = \frac{R_{\text{баз}}}{R_{\text{ағым}}} \times 100 \quad (7)$$

мұнда $R_{\text{баз}}$, $R_{\text{ағым}}$ – меншікті тәуекелдің базалық және ағымды деңгейі.

Егер тәуекелдің ағымды деңгейі базалық деңгейден жоғары болмаса қауіпсіздік коэффициенті жүйенің тұрақтылығын сақтайды. Егер ағымды тәуекел артса коэффициент мәні төмендейді және тасымалдаушының тұрақтылығының қорытынды индексін кемітеді.

Апаттық және оқыс оқиғалар бойынша толық деректер болмаған жағдайда $K_{\text{ққ}} = 1$ бейтарап мәні қолдануға болады, бірақ бұл ретте зерттеу нәтижелерінде жүк айналымы артқан кезде қауіпсіздікті сақтау үшін қажетті үлестік тәуекелді төмендету деңгейі міндетті түрде есептеледі.

Алтыншы кезеңде теміржол тасымалдаушысының қызметінің тұрақтылықтың интегралды индексі есептеледі.

Бұл үшін қозғалыс қауіпсіздігі коэффициентін ескеріп, тасымалдаушының ресурстық және ұйымдастырушылық дайындығының пайдалану жүктемесінің шамасына қолданысы қолданылады:

$$I_{\text{тұр}} = \frac{I_p}{I_n} \times K_{\text{ққ}} \quad (8)$$

мұнда I_p – тасымалдаушының ресурстық және ұйымдастырушылық дайындығының индексі (жылжымалы құрамның техникалық дайындығының көрсеткіштері, инфрақұрылым жағдайы, жөндеу ресурстарымен қамтамасыздандырылуы, цифрландыру деңгейі, кадрлық дайындығы, диспетчерлік басқарудың тиімділігі);

I_{Π} – пайдалану жүктемесінің индексі.

Қорытындысында есептелген тұрақтылық индексінің түсіндірмесі жүргізіледі (кесте 1).

Кесте 1 – Тұрақтылық индексін бағалау

Тұрақтылық индексінің мәні	Тұрақтылық сипаттамасы
$I_{\text{тұр}} \geq 1$	Тасымалдаушы тұрақтылығы сақталады, жүктеменің артуы қорлық, ұйымдастырушылық шаралар мен қауіпсіздікті қамтамасыз ету шараларымен өтеледі.
$0,95 \leq I_{\text{тұр}} < 1$	Тұрақтылық рұқсат етілген кернеу аймағында, басқарудың жеке элементтерін күшейту қажет
$0,9 \leq I_{\text{тұр}} < 0,95$	Тұрақтылық қорының кемуі байқалады, басқару және техникалық шараларды қабылдау қажет
$I_{\text{тұр}} < 0,9$	Тасымалдаушының тұрақтылығы жоғары тәуекелділік аймағында, тасымалдау процесін басқару жүйесіне және қозғалыс қауіпсіздігіне кешенді араласу қажет

Зерттеуде вагон жүктемесі есептеледі немесе инфрақұрылымдық телім пайдаланылады. Бұл көрсеткіш тасымалдау процесіне жаңа немесе жаңғыртылған телім қарқынын бағалау үшін қолданылады.

Бір вагонның орташа жүктемесі келесі формуламен есептеледі:

$$q = \frac{Q_{\text{тел}}}{N_{\text{в}}} \quad (9)$$

мұнда $Q_{\text{тел}}$ – телім бойынша тасымалданған жүк көлемі;

$N_{\text{в}}$ – вагондар саны.

Бүр вагонның орташа жүктемені анықтау инфрақұрылымды жаңғыртуды нақты қолдану жүктемесімен және қауіпсіздік талаптарымен байланыстыруға мүмкіндік береді.

Егер жаңа телім бірден қолданысқа көлемді тасымалдауға берілсе, бұл жағдайда оны пайдалануға ендіру жолдың жағдайын, сигнализация, байланыс, электрмен жабдықтау құрылғыларын күшейтілген бақылаумен, сонымен қатар технологиялық тәртіптің сақталуын қамтамасыз етумен қатар жүруі тиіс.

Нәтижелері және оларды талқылау.

Заманауи жағдайларда теміржол тасымалдаушысы қызметінің тұрақтылығы жүкті тасымалдау көлемімен ғана емес, тасымалдаушының көлік жұмысының өсіп келе жатқан көлемін қауіпсіз орындау қабілетімен бағалануы тиіс. Теміржол көлігі үшін тасымалдаудың тонна физикалық өсімін ғана емес, сонымен қатар тонна-километрде жүк айналымының өсуін ескеру өте маңызды, себебі бұл көрсеткіш инфрақұрылымға, жылжымалы құрамға, локомотив бригадасына, диспетчерлік басқаруға, жөндеу базасына және қозғалыс қауіпсіздігі жүйесіне нақты пайдалану жүктемесін айқындайды.

ҚР теміржол көлігінің соңғы жылдардағы көрсеткіштер талдауы теміржол жүйесіне жүктеме бірқалыпсыз өсуін көрсетеді: жалпы тасымалдау көлеміне қарағанда жүк

айналымы жылдам өседі, бұл тасымалдаудың орташа қашықтығының артуын және көлік жүйесін қарқынырақ пайдалануын көрсетеді.

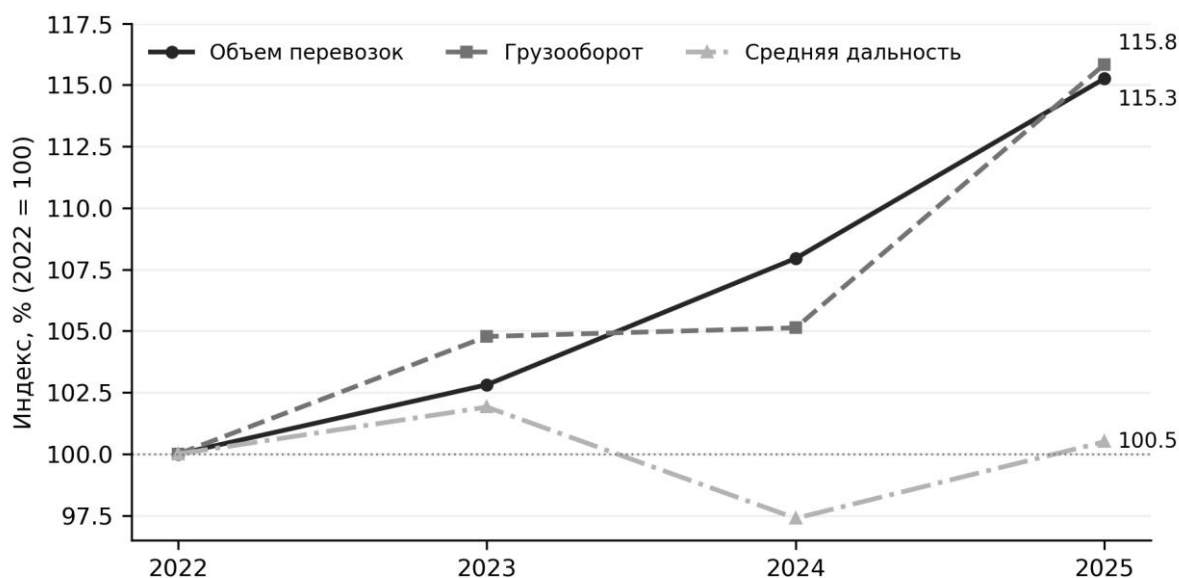
Пайдалану жүктеменің өзгеруін бағалау үшін жүк айналымы динамикасы мен теміржол көлігінің көліктік жұмысының келесі есептеулері орындалды (кесте 2).

Кесте 2 – Жұқағының динамикасы мен көлік жұмысын есептеу қорытындысы

Көрсеткіш	2022	2023	2024	2025	Абсолютті өзгеріс			Өсу қарқыны 2025/2024
					2023	2024	2025	
Тасымалдау көлемі, млн тонн	404,9	416,3	437,1	466,7	+11,4	+20,8	+29,6	106,8%
Жұкайналымы, млрд т-км	311,9	326,8	327,9	361,3	+14,9	+1,1	+33,4	110,2%
Тасымалдаудың орташа қашықтығы, км	770,31	785,01	750,17	774,16	+14,7	-34,84	+23,99	103,2%
Қозғалыс қауіпсіздігінің бұзу саны	-	-	728	657	-	-	-71	-9,8%

Ескерту: <https://stat.gov.kz/> деректер негізінде авторлар құрастырған.

Әртүрлі өлшем бірліктерінде көрсетілген көрсеткіштердің салыстырмалылығын қамтамасыз ету үшін олардың динамикасы 2022 жылдың базалық деңгейіне қатысты нормаланған (2022=100%). Өзгерістердің индекстелген траекториясы 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1 – 2022-2025 жылдардағы тасымалдау көлемінің, жүк айналымының және тасымалдаудың орташа қашықтығының индекстелген динамикасы

Алынған нәтижелер 2025 жылы теміржол көлігі тек қана жүк көлемін көбірек тасымалдап қана қоймай, сонымен қатар тасымалдау жұмысының ауқымды көлемін де орындағанын көрсетті. Тасымалдаудың орташа қашықтығы 750,17 км. -ден 774,16 км. артты, яғни 23,99 км, немесе 3,2%. Бұл, тасымалдаушыға жүктеме жүктің салмағының

өсуімен ғана емес, тасымалдаудың қашықтығының артуымен де өскенің білдіреді. Тасымалдаушының қызметінің мұндай жағдайлардағы тұрақтылығы ұзақтау бағыттарда, инфрақұрылым мен жылжымалы құрамның жоғарырақ жүктелуі жағдайында, тасымалдау процесінің сенімділігін қамтамасыз ету қабілетіне байланысты.

ЖШС «КТЖ – Жүк Тасымалы» Ұлттық компаниясының қызметін теміржол тасымалының түйінді қатысушысы ретінде 3 кестеде көрсетілген көрсеткіштерін қарастырайық [14].

Кесте 3 – ЖШС «КТЖ – Жүк Тасымалы» жұмысының көрсеткіштерінің есебінің қорытындысы

Көрсеткіш	2024	2025	Абсолютті өзгеріс	Өсу қарқыны 2025/2024
КТЖ-ЖТ тасымалдау көлемі, млн тонн	303,32	320,0	+16,68	105,5%
Тарифті жүкайналымы, млрд т-км	262,73	289,0	+26,27	110,0%
Тасымалдаудың орташа қашықтығы, км	866,18	903,13	+36,95	104,3%
Транзитті тасымалдар, млн тонн	27,5	33,0	+5,5	120,0%
Қозғалыс қауіпсіздігінің бұзу саны	28	21	-7	-25,0%

Ескерту: <https://www.akorda.kz/> деректер негізінде авторлар құрастырған.

Алынған нәтижелер ұлттық тасымалдаушының тарифті жүк айналымының артуын және тасымалдың физикалық өсуін көрсетеді. Тасымалдау көлемі 5,5% артқан жағдайда көлік жұмысы 10% артты, ал орташа есептеу ұзындығы 866,18 км - 903,13 км. артты.

Транзитті тасымалдау ерекше маңызға ие болды. 2025 жылы ҚТЖ тасымалының жалпы көлемінде транзит үлесі келесі:

$$D_{\text{тр}} = \frac{33}{320} \times 100 = 10,3\%$$

Согнымен, компанияның шамамен 10,3% тасымалдау жұмысы транзитті жүктерге үлесілі. Тасымалдаушының тұрақтылығы мақсатында бұл принципті мә, себебі транзитті тасымалдар мерзімдерді сақтау, мемлекетаралық маршруттардың үйлесімділігі, шекаралық өткелдердің өткізу қабілеті, жылжымалы құрамның техникалық дайындығы және негізгі дәліздердегі қозғалыс қауіпсіздігіне қойылатын жоғары талаптарды қояды.

Жүктемнің өсуін кешенді бағалау үшін пайдалану жүктемесінің индекстері анықталды:

- жалпы теміржол көлігі үшін:

$$I_{\text{п}} = 0,4 \times 1,068 + 0,4 \times 1,102 + 0,2 \times 1,032 = 1,074$$

- ЖШС «КТЖ – Жүк тасымалы» АҚ:

$$I_{\text{п}} = 0,4 \times 1,055 + 0,4 \times 1,1 + 0,2 \times 1,043 = 1,071$$

Демек, пайдалану жүктемесінің есепті индексі жалпы теміржол көлігі үшін 1,074 құрады және ЖШС «ҚТЖ – Жүк тасымалы» 1,074 құрады. Бұл 2025 жылы жүйеге барлық қсым сәйкесінше 7,4% ден 7,1% өскенің білдіреді.

Зерттеудің маңызды нәтижесі бұл жүк айналымы артқан жағдайда, тасымалдың физикалық көлемі өскенге қарағанда қауіпсіздікке талаптар жылдам өсуі қажет деген қорытынды. Егер оқиғалар немесе инциденттер деңгейі көлік жұмысыне қатысты қарастыратын болса, онда қауіпсіздіктің алдыңғы абсолютті деңгейін сақтау үшін меншікті тәуекел кемуі қажет.

Меншікті тәуекелдің қажетті кемуі келесіні құрады:

- жалпы теміржол көлігі үшін:

$$R_{\text{төм}} = \left(1 - \frac{1}{1,102}\right) \times 100 = 9,3\%$$

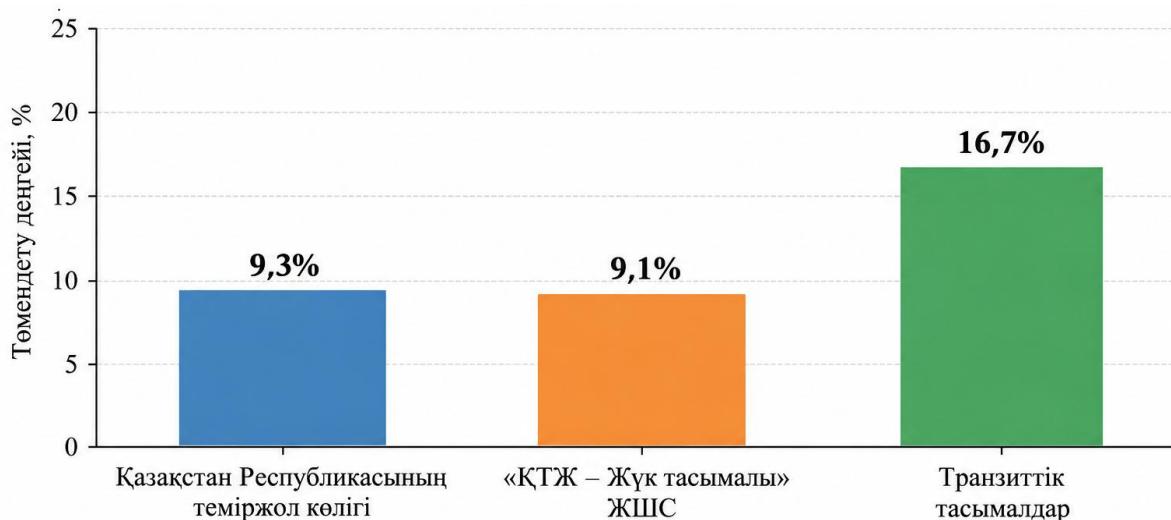
- ЖШС «ҚТЖ – Жүк тасымалы»:

$$R_{\text{төм}} = \left(1 - \frac{1}{1,1}\right) \times 100 = 9,1\%$$

- 20% өсендегі транзитті тасымалдар үшін

$$R_{\text{төм}} = \left(1 - \frac{1}{1,2}\right) \times 100 = 16,7\%$$

Нәтижелер жүк айналымы 10,2%-ға өскен кезде қозғалыс қауіпсіздігінің бұзылуының үлес қаупі абсолютті тәуекел деңгейі жоғарыламауы үшін кем дегенде 9,3%-ға төмендетілуі керек екенін көрсетеді. ҚТЖ-Жүк тасымалы үшін меншікті тәуекелдің қажетті төмендеуі шамамен 9,1%, ал транзиттік тасымалдар бойынша-шамамен 16,7% құрайды. Бұл жүк ағындарының өсуі жағдайында тасымалдаушының тұрақтылығы тек тасымалдау көлемін ұлғайту арқылы қамтамасыз етілмейтінін қорытындылауға мүмкіндік береді. Ол қозғалыс қауіпсіздігі жүйесінің озық дамуын талап етеді (сурет 2).



Сурет 2 – Қозғалыс қауіпсіздігі бойынша меншікті тәуекелді қажетті төмендету деңгейі

Алынған есептеулерді ескере отырып, теміржол тасымалдаушысы қызметінің интегралды тұрақтылығын техникалық, ұйымдастырушылық шаралар мен қауіпсіздікті қамтамасыз ету шаралары есебінен пайдалану жүктемесі мен Тасымалдаушының осы жүктемені өтеу қабілетінің арақатынасы арқылы бағалаған жөн. Жалпы теміржол көлігі үшін қозғалыс қауіпсіздігін бұзу санын $728-657=71$ жағдайға, «ҚТЖ - Жүк тасымалы»

ЖШС үшін $28-21=7$ жағдайға қысқарту $K_{КҚ} = 1$, Қауіпсіздік коэффициентінің мәнін қабылдауға мүмкіндік береді, өйткені жүйенің тұрақтылығын сақтау көрсетіледі. Осыған байланысты, егер ресурстық дайындықтың бейтарап мәні $I_p = 1$ және қауіпсіздік коэффициенті $K_{КҚ} = 1$, қабылданса, онда жүктеме өскен кезде қызметтің тұрақтылығының интегралды индексі болады:

$$\text{- жалпы теміржол көлігі үшін: } I_{\text{тұр}} = \frac{1}{1,074} = 0,931$$

$$\text{- ЖШС «ҚТЖ – Жүк тасымалы» АҚ: } I_{\text{тұр}} = \frac{1}{1,071} = 0,933.$$

Бұл дегеніміз, ресурстардың, техникалық қызмет көрсетудің, диспетчерлік бақылаудың және қауіпсіздік деңгейінің алдын-алудың тұрақты деңгейімен тасымалдау процесінің тұрақтылығы шамамен 6,7-6,9% төмендеуі мүмкін. Демек, жүк ағындарының өсуі тек тасымалдау қабілетінің артуымен ғана емес, сонымен қатар жөндеу базасының күшеюімен, жылжымалы құрамның жаңаруымен, цифрлық мониторингтің дамуымен, персоналдың біліктілігін арттырумен және қозғалыс қауіпсіздігін тәуекелге бағдарланған басқаруды жетілдірумен қатар жүруі керек.

Зерттеу нәтижелері сонымен қатар инфрақұрылымды жаңарту тасымалдаушының тұрақтылығының негізгі шарттарының біріне айналатынын көрсетеді. 2025 жылы Достық – Мойынты учаскесінде пайдалануға берілген екінші жолдар бойынша 6 млн тонна жүк немесе 100 мыңнан астам вагон тасымалданды [15]. Бір вагонға орташа есеппен жүктеме келесі:

$$q = \frac{6000000}{100000} = 60 \text{ тонна/вагон}$$

Бұл есеп жаңа инфрақұрылымдық учаскелердің қарқынды пайдалануға бірден тартылатынын көрсетеді. Сондықтан өткізу қабілетін кеңейту жолдың жай-күйін, сигнализацияны, байланысты, энергетикалық экономиканы бақылауды және технологиялық тәртіпті сақтауды күшейтумен қатар жүруі керек. Ресми деңгейде сондай-ақ теміржол инфрақұрылымын салу және жаңғырту жобаларының жалпы ұзындығы 3900 км құрайтыны, ал жасанды интеллект қолданылатын шешімдерді қоса алғанда, Цифрлық жобалар компания қызметінің қауіпсіздігін, тиімділігін және ашықтығын қамтамасыз ету үшін іске асырылатыны атап өтілді.

Осылайша, есептеулер жүк ағындарының өсуі теміржол тасымалдаушысы қызметінің барлық элементтеріне жүктемені күшейтетінін растайды. Тұрақтылыққа өзара байланысты үш процесс айтарлықтай әсер етеді: тасымалдау көлемінің ұлғаюы, жүк айналымының өсуі және тасымалдаудың орташа қашықтығының ұзаруы. Сонымен қатар, қозғалыс қауіпсіздігі қосымша емес, тұрақтылықты шектейтін өлшем болып табылады: егер қауіпсіздік деңгейі төмендесе, тасымалдаушының қызметі өндірістік және қаржылық көрсеткіштердің өсуімен де тұрақты болып саналмайды.

Осыған байланысты жүк ағындарының өсуі жағдайында теміржол тасымалдаушысы қауіпсіздікті басқарудың реактивті моделінен алдын алу моделіне көшуі керек. Бұл тәуекелдерді болжаушыларды үнемі талдау қажеттілігін білдіреді: техникалық ақаулар, инфрақұрылымдық себептер бойынша кідірістер, регламенттердің бұзылуы, жекелеген учаскелердің шамадан тыс жүктелуі, уақтылы техникалық қызмет көрсетудің болмауы, қызметкерлердің қателіктері және ақпараттық жүйелердегі ақаулар. Жүк айналымы мен транзиттік жүктеме неғұрлым жоғары болса, цифрлық диагностика, болжамды қызмет көрсету және пойыздардың қозғалысын автоматтандырылған бақылау соғұрлым маңызды болады.

Қорытынды.

Жүргізілген зерттеу жүк ағынының артуы кезінде теміржол тасымалдаушысы қызметінің тұрақтылығы тек тек тасымал көлемінің ұлғаюын ғана емес, сонымен қатар тасымалдау үдерісінің қауіпсіз, сенімді, үздіксіз жұмыс атқаруын қамтамасыз ету қабілетін көрсететін кешенді симаттама түрінде қарастырылуы қажет екенің растады. Жүк айналымының артуы, тасымалдаудың орташа қашықтығының өсуі және транзиттік ағындардың кеңеюі жылжымалы құрамға, инфрақұрылымға, диспетчерлік басқаруға, жөндеу базасына, қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз ету жүйесіне түсетін пайдалану жүктемесін күшейтеді. Орындалған есептеулер жүк айналымы 10–10,2% ұлғайған жағдайда теміржол тасымалдаушысы қозғалыс қауіпсіздігінің меншікті тәуекелділігін азаюын шамамен 9%, ал транзитті тасымалдаулар сегментінде 16,7% кем емес болуын қамтамасыз етуі қажет.

Бұл қозғалыс қауіпсіздігі екінші деңгейлі көрсеткіш емес, тасымалдаушының тұрақтылығының негізгі критерийі болуы қажет екенің көрсетеді. Ресурстық және ұйымдастырушылық дайындықтың тұрақты деңгейінде пайдалану жүктемесінің өсуі тұрақтылық қорының төмендеуіне әкеледі, бұл инфрақұрылымды жаңғырту, цифрлық мониторингті дамыту және тәуекелге бағдарланған басқаруды жетілдіру бойынша озық шараларды талап етеді.

Теміржол тасымалдаушысы қызметінің тұрақтылығын бағалауға ұсынылған есептеу-талдау тәсілінің артықшылығы-бұл тасымалдау қызметінің динамикасын тіркеуге ғана емес, сонымен қатар динамиканың қозғалыс қауіпсіздігі мен тасымалдаушының ресурстық дайындығына қойылатын талаптарды қаншалықты күшейтетінін анықтауға мүмкіндік береді. Ұсынылған тәсіл тасымалдау үдерісінің ағымдағы мәселелерін ғана емес, сонымен қатар жүк ағындарының өсуі кезінде туындайтын ықтимал тәуекелдерді де анықтауға мүмкіндік береді.

Қаржыландыру. Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (06.10.2025 ж. № 25-27 ГФ/398 гранты «Жалпы және жалпыға ортақ пайдаланылмайтын теміржол жолдарындағы тасымалдаушылардың қауіпсіздігін басқару жүйесінің тиімділігін бағалау әдістемесі» 06.10.2025 АР26199023).

Әдебиеттер тізімі

1. Ұлттық статистика бюросы. Қазақстан Республикасы Стратегиялық жоспарлау және реформалар агенттігінің. Көлік. [Электрондық ресурс]. <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-transport/publications/280668/> (Қол жеткізілді: 04.04.2025).
2. Олжас Бектенов Президенттің көлік-транзиттік әлеуетті дамыту жөніндегі тапсырмаларын жүзеге асыру бойынша кеңес өткізді [Электрондық ресурс]. <https://primeminister.kz/news/olzas-bektenov-prezidenttin-kolik-tranzittik-aleuetti-damytu-zonindegi-tapsyrmalaryn-zuzege-asyru-boiynsa-kenes-otkizdi-31266> (Қол жеткізілді: 05.04.2025).
3. Railway safety indicators for 2024 [Электрондық ресурс]. <https://www.uic.org/com/enews/article/railway-safety-indicators-for-2024> (Қол жеткізілді: 05.04.2025).
4. Railway safety statistics in the EU [Электрондық ресурс]. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Railway_safety_statistics_in_the_EU (Қол жеткізілді: 10.04.2025).
5. ҚТЖ қауіпсіз және тиімді тасымалдау үшін инновацияларды енгізеді [Электрондық ресурс]. <https://rail-news.kz/ru/news/23337-ktz-vnedriaet-innovacii-dlia-bezopasnyx-i-effektivnyx-perevozok.html> (Қол жеткізілді: 10.04.2025).

6. Kisselyova O., Izbairova A., Altayeva Z., Kulmagambetova Z. Ensuring secure transport infrastructure in supply chains //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2025. – Vol. 640. – P. 02002. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202564002002>
7. Zhu R., Tan K., Xin X. Speed up for sustainable development: High-speed rail and corporate ESG performance //Energy economics. – 2024. – Vol. 138. – P. 107821. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107821>
8. Bešinović, N. (2020). Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda. *Transport Reviews*, 40(4), 457-478. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1728419>
9. Sangiorgio, V., Mangini, A. M., & Precchiazzi, I. (2020). A new index to evaluate the safety performance level of railway transportation systems. *Safety science*, 131, 104921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104921>
10. Rungskunroch, P., Jack, A., & Kaewunruen, S. (2021). Benchmarking on railway safety performance using Bayesian inference, decision tree and petri-net techniques based on long-term accidental data sets. *Reliability engineering & system safety*, 213, 107684.
11. Restel, F. (2025). The operational resilience evaluation method as a tool for decision-making during traffic disruptions in the railway system. *Transport*, 40(2), 120-140. DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2025.22889>
12. Li, H., Qi, L., Wang, M., & Liu, J. (2025). Operational resilience modeling of cross-border freight railway systems: A study of strategies to improve proactive and reactive capabilities. *Reliability Engineering & System Safety*, 257, 110856. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110856>
13. Szaciłło, L., Jacyna, M., Szczepański, E., & Izdebski, M. (2021). Risk assessment for rail freight transport operations. *Eksploatacja i Niezawodność*, 23(3), 476-488. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein.2021.3.8>
14. Мемлекет басшысы «Қазақстан темір жолы» ҰК» АҚ басқарма төрағасы Талғат Алдыбергеновті қабылдады [Электрондық ресурс]. <https://www.akorda.kz/kz/memleket-basshysy-kazakstan-temir-zholy-uk-ak-baskarma-toragasy-talgat-aldybergenovti-kabyldady-1602742> (Қол жеткізілді: 30.04.2025).
15. Tokayev supported KTZ's initiative [Электрондық ресурс]. <https://dknews.kz/ru/politika/380878-tokaev-podderzhal-iniciativu-ktzh> (Қол жеткізілді: 30.04.2025).

References

1. Bureau of National Statistics. of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan. *Transport*. [Electronic resource]. <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-transport/publications/280668/> (Accessed: 04.04.2025).
2. Olzhas Bektenov Holds Meeting on Implementation of President's Instructions in Transit and Transport Development [Electronic resource]. <https://primeminister.kz/news/olzas-bektenov-prezidenttin-kolik-tranzittik-aleuetti-damytu-zonindegi-tapsyrmalaryn-zuzege-asyru-boiynsa-kenes-otkizdi-31266> (Accessed: 05.04.2025).
3. Railway safety indicators for 2024 [[Electronic resource]. <https://www.uic.org/com/enews/article/railway-safety-indicators-for-2024> (Accessed: 05.04.2025).
4. Railway safety statistics in the EU [Electronic resource]. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Railway_safety_statistics_in_the_EU (Accessed: 10.04.2025).
5. KTZ introduces innovations for safe and efficient transportation [Электрондық ресурс]. <https://rail-news.kz/ru/news/23337-ktz-vnedriaet-innovacii-dlia-bezopasnyx-i-effektivnyx-perevozok.html> (Accessed: 10.04.2025).

6. Kisselyova, O., Izbairova, A., Altayeva, Z., & Kulmagambetova, Z. (2025). Ensuring secure transport infrastructure in supply chains. In E3S Web of Conferences (Vol. 640, p. 02002). EDP Sciences. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202564002002>
7. Zhu, R., Tan, K., & Xin, X. (2024). Speed up for sustainable development: High-speed rail and corporate ESG performance. Energy economics, 138, 107821. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107821>
8. Bešinović, N. (2020). Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda. Transport Reviews, 40(4), 457-478. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1728419>
9. Sangiorgio, V., Mangini, A. M., & Precchiazzi, I. (2020). A new index to evaluate the safety performance level of railway transportation systems. Safety science, 131, 104921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104921>
10. Rungskunroch, P., Jack, A., & Kaewunruen, S. (2021). Benchmarking on railway safety performance using Bayesian inference, decision tree and petri-net techniques based on long-term accidental data sets. Reliability engineering & system safety, 213, 107684.
11. Restel, F. (2025). The operational resilience evaluation method as a tool for decision-making during traffic disruptions in the railway system. Transport, 40(2), 120-140. DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2025.22889>
12. Li, H., Qi, L., Wang, M., & Liu, J. (2025). Operational resilience modeling of cross-border freight railway systems: A study of strategies to improve proactive and reactive capabilities. Reliability Engineering & System Safety, 257, 110856. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110856>
13. Szaciłło, L., Jacyna, M., Szczepański, E., & Izdebski, M. (2021). Risk assessment for rail freight transport operations. Eksploatacja i Niezawodność, 23(3), 476-488. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein.2021.3.8>
14. Meeting with Chairman of the Board of JSC NC" Kazakhstan Temir Zholy" Talgat Aldybergenov [Electronic resource]. <https://www.akorda.kz/kz/memleket-basshysy-kazakstan-temir-zholy-uk-ak-baskarma-toragasy-talgat-aldybergenovti-kabyldady-1602742> (Accessed: 30.04.2025).
15. Tokayev supported KTZ's initiative [Electronic resource]. <https://dknews.kz/ru/politika/380878-tokaev-podderzhal-iniciativu-ktzh> (Accessed: 30.04.2025).

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПЕРЕВОЗЧИКА ПРИ РОСТЕ ГРУЗОПОТОКОВ С УЧЕТОМ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ

***Аннотация.** Статья посвящена исследованию факторов, определяющих способность железнодорожного перевозчика сохранять надежность, непрерывность и безопасность перевозочного процесса при увеличении объемов транспортной работы. Актуальность исследования обусловлена увеличением объемов перевозок, ростом грузооборота, удлинением средней дальности перевозки и усилением транзитной нагрузки, что приводит к повышенному воздействию на инфраструктуру, подвижной состав, диспетчерское управление, ремонтную базу и систему обеспечения безопасности движения. В данных условиях устойчивость деятельности железнодорожного перевозчика следует рассматривать как способность обеспечивать стабильное выполнение перевозок при воздействии технических, инфраструктурных, организационных, кадровых, финансовых, цифровых и внешнеэкономических факторов. При этом, в работе обосновано, что устойчивость железнодорожного перевозчика не может оцениваться только по эксплуатационным или экономическим показателям, поскольку увеличение транспортной работы должно сопровождаться сохранением управляемости и допустимого уровня рисков. В качестве методической основы предложен расчетно-аналитический подход, включающий оценку динамики грузопотоков, расчет*

средней дальности перевозки, определение индекса эксплуатационной нагрузки, оценку транзитной составляющей, а также расчет требуемого снижения удельного риска безопасности движения. Конечным результатом оценки является определение интегрального индекса устойчивости, значение которого позволяет выработать ряд мероприятий по обеспечению безопасности движения. Особое внимание уделено коэффициенту безопасности движения, который рассматривается как ограничивающий параметр интегральной устойчивости перевозчика. Практическая значимость методики заключается в возможности использования расчетных показателей для принятия управленческих решений, направленных на повышение надежности перевозок, предупреждение нарушений безопасности движения и обеспечение устойчивого развития железнодорожных перевозчиков в современных условиях.

Ключевые слова: железнодорожный перевозчик, устойчивость, грузопотоки, безопасность движения, эксплуатационная нагрузка, удельный риск.

ASSESSMENT OF THE STABILITY OF A RAILWAY CARRIER WITH AN INCREASE IN FREIGHT FLOWS, TAKING INTO ACCOUNT TRAFFIC SAFETY

Abstract. The article is devoted to the study of the factors determining the ability of a railway carrier to maintain the reliability, continuity and safety of the transportation process with an increase in the volume of transport work. The relevance of the study is due to an increase in traffic volumes, an increase in cargo turnover, an extension of the average range of transportation and an increase in transit load, which leads to an increased impact on infrastructure, rolling stock, dispatch control, repair facilities and the traffic safety system. In these conditions, the sustainability of the railway carrier's activities should be considered as the ability to ensure stable transportation under the influence of technical, infrastructural, organizational, personnel, financial, digital and external economic factors. At the same time, the paper proves that the stability of a railway carrier cannot be assessed solely by operational or economic indicators, since an increase in transport work must be accompanied by maintaining manageability and an acceptable level of risks. As a methodological basis, a computational and analytical approach is proposed, including an assessment of the dynamics of cargo flows, the calculation of the average range of transportation, the determination of the operational load index, the assessment of the transit component, as well as the calculation of the required reduction in the specific risk of traffic safety. The final result of the assessment is the determination of an integral stability index, the value of which allows us to develop a number of measures to ensure traffic safety. Special attention is paid to the traffic safety coefficient, which is considered as a limiting parameter of the carrier's integral stability. The practical significance of the methodology lies in the possibility of using calculated indicators to make management decisions aimed at improving the reliability of transportation, preventing traffic safety violations and ensuring the sustainable development of railway carriers in modern conditions.

Keywords: railway carrier, stability, cargo flows, traffic safety, operational load, specific risk.

Авторлар туралы мәлімет

Аймагамбетова Бибижан Асылбековна	Докторант, Сәтбаев Университет, Алматы, Қазақстан, e-mail: Aimagambetova.B@stud.satbayev.university
Киселёва Ольга Геннадьевна	Техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Сәтбаев Университет, Алматы, Қазақстан, e-mail: o.kisselyova@satbayev.university
Капезова Назгуль Газизовна	Оқытушы, Логистика және көлік академиясының Алматы колледжі, Алматы, Қазақстан, e-mail: eskozhanova.nazg@gmail.com
Имашева Гульнар Махмутовна	Техника ғылымдарының докторы, профессор Сәтбаев Университет, Алматы, Қазақстан, E-mail: g.imasheva@satbayev.university

Токмурзина Наталья Анатольевна	Техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Сәтбаев Университет, Алматы, Қазақстан, e-mail: n.tokmurzina@satbayev.university
-----------------------------------	--

Сведение об авторах

Аймағамбетова Бибижан Асылбековна	Докторант, Satbayev University, Алматы, Казакстан, e-mail: Aimagambetova.B@stud.satbayev.university
Киселёва Ольга Геннадьевна	Кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Satbayev University, Алматы, Казакстан, e-mail: o.kisselyova@satbayev.university
Капезова Назгуль Газизовна	Преподаватель, Алматинский колледж Академий логистики и транспорта, Алматы, Казакстан, e-mail: eskozhanova.nazg@gmail.com
Имашева Гульнар Махмутовна	Доктор технических наук, профессор, Satbayev University, Алматы, Казакстан, E-mail: g.imasheva@satbayev.university
Токмурзина Наталья Анатольевна	Кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Satbayev University, Алматы, Казакстан, e-mail: n.tokmurzina@satbayev.university

Information about the authors

Aimagambetova Bibizhan	Doctoral student, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: Aimagambetova.B@stud.satbayev.university
Kisselyova Olga	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: o.kisselyova@satbayev.university
Kapezova Nazgul	Teacher, Almaty College of the Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, e-mail: eskozhanova.nazg@gmail.com
Imasheva Gulnar	Doctor of Technical Sciences, Professor, Satbayev University, 22a Satpaev str., 050013, Almaty, Kazakhstan, e-mail: g.imasheva@satbayev.university
Tokmurzina Natalya	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: n.tokmurzina@satbayev.university



ЛОГИСТИКА, ТАСЫМАЛДАУДЫ ҰЙЫМДАСТЫРУ, КӨЛІКТЕГІ ҚАУІПСІЗДІК
ЛОГИСТИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, БЕЗОПАСНОСТЬ НА ТРАНСПОРТЕ
LOGISTICS, TRANSPORTATION ORGANIZATION, TRANSPORT SECURITY

УДК 656.7:502.131.1

МРНТИ 73.37.75

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_6

Г.К. Калиева^{1*}, Г.О. Алтаева, З.Е.Конакбай¹, А.С.Альчимбаева²

¹Академия гражданской авиации, г.Алматы, Казахстан

²Академия логистики и транспорта, г. Алматы, Казахстан.

*E-mail: g.kaliyeva@agakaz.kz

ЭКОНОМИКА «ЗЕЛЁНОЙ» ЛОГИСТИКИ В ОРГАНИЗАЦИИ АВИАПЕРЕВОЗОК

Аннотация. Цель исследования - разработать воспроизводимый подход к комплексной оценке экономической, экологической и операционной результативности проектов зелёной логистики в авиации и продемонстрировать его применение на иллюстративном сценарии, рассмотренном в контексте Казахстана. Информационную базу составили официальные документы Международной ассоциации воздушного транспорта (IATA), Международной организации гражданской авиации (ICAO), Бюро национальной статистики Республики Казахстан и Авиационной администрации Казахстана, нормативные правовые акты и рецензируемые научные публикации. Методика включает расчёт чистой приведённой стоимости (Net Present Value, NPV), оценку сокращения выбросов парниковых газов жизненного цикла, измерение операционного результата, целевое нормирование частных показателей и их агрегирование с заданными весами. Для мониторинга предложена система из восьми ключевых показателей эффективности (Key Performance Indicators, KPI), из которых для демонстрационного интегрального индекса используются три агрегированных результата: экономический, экологический и операционный. В сценарном расчёте для условного авиаперевозчика при 2%-ной экономии топлива, 5%-ной доле устойчивого авиационного топлива (Sustainable Aviation Fuel, SAF) и сценарном сокращении выбросов жизненного цикла SAF на 65% снижение выбросов составило 5,19%, NPV - 3,24 млн долл. США, а сокращение средней продолжительности полётно-наземного цикла - 6,67%. При равных весах интегральный индекс составил 0,740. В четырёх рассмотренных системах весов значение индекса находилось в диапазоне 0,713–0,778. Анализ чувствительности NPV к ценовой премии SAF показал порог безубыточности около 483 долл. США/т при прочих неизменных параметрах. Научная новизна заключается в отраслевой адаптации методологии составных индикаторов к предварительному отбору проектов зелёной авиационной логистики. Ограничением является сценарный, а не корпоративный характер расчётных данных; фактическая эффективность внедрения требует последующей апробации на верифицированных данных конкретной авиакомпания или аэропорта.

Ключевые слова: зелёная логистика, авиационные перевозки, экономическая эффективность, устойчивое авиационное топливо, SAF, ключевые показатели эффективности, KPI, чистая приведённая стоимость, NPV, выбросы парниковых газов, CORSIA, декарбонизация.

Введение.

Авиационный транспорт обеспечивает пространственную связанность, мобильность населения и перемещение грузов на большие расстояния, одновременно формируя значительный спрос на авиационное топливо и связанные с ним выбросы парниковых газов. Поэтому задача повышения экологической результативности авиационной логистики связана не только с выбором отдельных низкоуглеродных технологий, но и с экономической оценкой их применения, операционной эффективностью и возможностью сопоставления различных проектов [1].

При оценке декарбонизации авиации необходимо различать непосредственные выбросы от сжигания авиационного топлива и выбросы жизненного цикла топлива. Последний показатель имеет принципиальное значение при оценке устойчивого авиационного топлива (SAF). В системе CORSIA сокращение выбросов от использования соответствующего топлива определяется с учётом его жизненного цикла, зависящего, в частности, от сырья, технологического процесса и региона производства [2]. ICAO предусматривает использование как установленных значений жизненного цикла, так и фактических значений, рассчитанных по утверждённой методологии и подтверждённых в установленном порядке.

Международные и национальные документы формируют общую основу для декарбонизации авиации. IATA в 2021 году закрепила отраслевую цель достижения нулевых нетто-выбросов углерода к 2050 году. CORSIA предусматривает систему мониторинга, отчётности и верификации выбросов международной авиации, а также механизм учёта допустимых видов топлива [3].

В научной литературе рассматриваются отдельные направления снижения экологической нагрузки логистики, включая оптимизацию транспортных процессов, повышение топливной эффективности, обновление парка, цифровизацию, устойчивое авиационное топливо и электрификацию [4, 5, 6]. Однако для управленческого выбора проекта требуется сопоставлять результаты, выраженные в разных единицах измерения: денежных, физических и относительных. Использование единого безразмерного индекса может облегчить предварительный отбор проектов при условии прозрачного нормирования и заранее заданных весов.

Цель исследования - разработать прозрачную и воспроизводимую процедуру комплексной оценки проектов зелёной авиационной логистики, объединяющую экономический, экологический и операционный результаты, и продемонстрировать её применение на сценарных данных, рассмотренных в контексте Казахстана.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- определить информационную базу и правила отбора данных;
- сформировать систему измеримых KPI для регулярного мониторинга;
- определить показатели, непосредственно используемые в интегральной оценке;
- привести разнородные результаты к сопоставимой безразмерной шкале;
- определить порядок задания весов;
- выполнить сценарный расчёт и анализ чувствительности;
- сопоставить предлагаемую процедуру с методологически близкими подходами;
- определить ограничения сценарной апробации и требования к последующей корпоративной проверке.

Авторский вклад заключается в адаптации методологии составных индикаторов к задаче предварительного отбора проектов зелёной авиационной логистики. Предлагаемая процедура связывает расчёт NPV, сокращение выбросов жизненного цикла и операционный KPI через заранее установленные целевые значения. При этом математические операции нормирования и взвешивания не рассматриваются как самостоятельная научная новизна.

Новым элементом предлагаемого подхода является их объединение с отраслевым паспортом КРІ и процедурой предварительного отбора авиационных проектов [7].

Материалы и методы исследования.

Исследование выполнено как прикладной сценарный анализ. В связи с отсутствием в открытом доступе полного набора корпоративных финансовых, топливных и операционных данных конкретной авиакомпании или аэропорта расчётная часть не является эмпирической оценкой фактически реализованного проекта. Она представляет собой сценарную апробацию расчётного алгоритма. Отраслевые данные Казахстана используются для формирования контекста, а не для вывода сценарных параметров таблицы 2.

Информационная база сформирована из четырёх групп источников:

- официальные документы IATA и ICAO по вопросам декарбонизации авиации, CORSIA и SAF [2, 3, 5];
- нормативные и стратегические документы Республики Казахстан [5, 6];
- официальная статистика воздушного транспорта [8];
- рецензируемые научные публикации по климатическому воздействию авиации, зелёной логистике и технологиям декарбонизации [9].

Включались источники, содержащие проверяемое определение, количественный показатель, метод расчёта либо нормативное требование. Материалы без идентифицируемого первоисточника и рекламные публикации исключались.

Алгоритм исследования включает следующие этапы:

- определение границ оценки и базового периода;
- формирование исходных экономических, экологических и операционных данных;
- расчёт экономических и физических эффектов;
- нормирование каждого результата относительно заранее установленной цели;
- агрегирование нормированных результатов с заданными весами;
- проведение анализа чувствительности и интерпретация результата.

Экономическая эффективность проекта оценивается посредством чистой приведённой стоимости:

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Где: I_0 - первоначальные инвестиции;

CF_t - чистый денежный поток в году t ;

r - ставка дисконтирования;

n - горизонт оценки.

В состав денежного потока могут включаться подтверждённые изменения затрат на топливо, техническое обслуживание, задержки и другие статьи, непосредственно связанные с проектом. Регулярные эксплуатационные расходы должны учитываться отдельно и вычитаться из денежного потока.

Поскольку экономический, экологический и операционный результаты имеют разные единицы измерения, они предварительно переводятся в безразмерную шкалу [0; 1] в соответствии с принципами построения составных индикаторов [10].

Для показателя, рост которого является желательным, используется целевое нормирование:

$$Z_j = \min(1, \max(0, \frac{\Delta x_j}{T_j})) \quad (2)$$

Отрицательный NPV получает значение $Z_e = 0$, а превышение установленной цели ограничивается значением 1. Такая шкала интерпретируется как степень достижения конкретной цели.

При коммерческом отборе проектов условие $NPV \geq 0$ проверяется отдельно. Это необходимо, поскольку высокий интегральный индекс не должен компенсировать финансовую неприемлемость проекта.

После нормирования три результата объединяются в интегральный индекс:

$$E_{green} = W_e Z_e + W_{env} Z_{env} + W_0 Z_0 \quad (3)$$

Где Z_e - нормированная экономическая оценка; Z_{env} - нормированная экологическая оценка; Z_0 — нормированная операционная оценка; W_e , W_{env} , W_0 — соответствующие веса, сумма которых равна единице.

Веса должны фиксироваться до проведения расчёта. При практическом применении их устанавливает экспертная комиссия авиакомпаний или аэропорта на основе утверждённых стратегических приоритетов. Для формализованного согласования экспертных оценок может применяться метод анализа иерархий с попарным сравнением критериев и проверкой согласованности суждений. Равные веса используются только как нейтральный демонстрационный вариант при отсутствии подтверждённых корпоративных приоритетов:

$$W_e = W_{er} = W_0 = \frac{1}{3} \quad (4)$$

Дополнительные наборы весов используются только для проверки устойчивости результата.

Для сценария с операционной экономией топлива s , долей SAF q после экономии и сокращением выбросов жизненного цикла SAF R используется следующее балансовое соотношение:

$$\Delta GHG = 1 - (1 - s) [(1 - q) + q (1 - R)] \quad (5)$$

Здесь ΔGHG - относительное сокращение выбросов парниковых газов; s , q и R выражаются долями единицы.

В сценарии предполагаются неизменный объём транспортной работы, сопоставимые границы оценки жизненного цикла и одинаковая удельная теплота сгорания традиционного топлива и SAF. При различии энергетической плотности топлива доля SAF должна пересчитываться на энергетическую основу.

Значение $R=65\%$ в настоящем исследовании является сценарным допущением, а не подтверждённым показателем конкретной партии SAF. На практике его следует определять по установленной методике CORSIA на основе фактического или соответствующего нормативного значения жизненного цикла. ICAO указывает, что жизненный цикл зависит от сырья, технологического пути и региона производства; поэтому единый коэффициент нельзя автоматически распространять на все виды SAF.

Предлагаемая формула не охватывает полный спектр климатического воздействия авиации, включая не- CO_2 -эффекты [11].

Результаты и их обсуждение.

Предлагаемая система предусматривает три взаимосвязанных уровня:

- первичные данные;
- расчётные KPI;
- интегральный индекс.

Такое разделение позволяет сохранить информацию, теряемую при простой агрегации: управленческое решение может опираться не только на итоговый индекс, но и на конкретный показатель, обусловивший его изменение.

В таблице 1 представлена система из восьми KPI для регулярного мониторинга авиакомпании или аэропорта. Она является более широкой, чем набор показателей, непосредственно используемый в демонстрационном индексе.

Таблица 1 – Система KPI для регулярного мониторинга авиакомпании или аэропорта

№	KPI и единица измерения	Источник данных	Период контроля	Ответственное подразделение	База и целевое значение
1.	Углеродная интенсивность: прямые выбросы, кг CO ₂ /ткм или пкм; выбросы жизненного цикла — отдельно, кг CO ₂ -экв. /ткм или пкм	топливный учёт; CORSIA/MRV; данные жизненного цикла SAF	ежемесячно; годовая верификация	служба устойчивого развития	базовый год; снижение по утверждённой траектории
2.	Топливная эффективность, кг/ткм или л/100 пкм	полётные данные; заправочные ведомости	ежемесячно	лётная эксплуатация	целевое снижение к базовому году
3.	Доля сертифицированного SAF, %	закупочные документы; подтверждение устойчивости	ежеквартально	закупки и устойчивое развитие	утверждённый корпоративный уровень
4.	NPV зелёных проектов, денежная единица	финансовый и управленческий учёт	ежеквартально	финансовая служба	NPV ≥ 0 и достижение инвестиционной цели
5.	Эксплуатационные затраты, % к базовому уровню	управленческий учёт	ежемесячно	финансовая и операционная службы	снижение при сопоставимом объёме работ
6.	Средняя продолжительность полётно-наземного цикла, мин/рейс	FDM (мониторинг данных полёта); A-CDM (совместное принятие решений аэропорту); ATM (организация воздушного движения).	ежемесячно	операционный контроль	сокращение к базовому периоду

7.	Электрификация наземной техники, % парка GSE	реестр активов; система энергоменеджмента	ежеквартально	аэропортовая служба	по плану обновления парка
8.	Цифровой документооборот, % электронных операций	DCS (система управления отправлением рейсов); ERP (система планирования ресурсов предприятия), т.е. система электронного документооборота	ежемесячно	ИТ-служба и операционные подразделения	базовый год; утверждённая доля электронных операций
<i>Источник: составлено авторами с учётом [9, 10]. Периодичность контроля и распределение ответственности предложены авторами.</i>					

Показатель № 6 сформулирован как «средняя продолжительность полётно-наземного цикла». Единообразное определение показателя обеспечивает сопоставимость паспорта KPI и расчётного примера.

Восемь KPI не включаются непосредственно в интегральную формулу одновременно. Это сделано по двум причинам. Во-первых, часть показателей является исходными или промежуточными характеристиками других результатов. Например, топливная эффективность влияет на экономический и экологический результат, а доля SAF является параметром экологического расчёта. Их прямое включение одновременно с NPV и сокращением выбросов могло бы привести к двойному учёту. Во-вторых, интегральный индекс предназначен для демонстрационного сопоставления трёх управленческих результатов - экономического, экологического и операционного [8].

Таким образом, восемь KPI образуют систему корпоративного мониторинга, а три агрегированных показателя - расчётную основу демонстрационного индекса. При практическом внедрении состав индекса может быть расширен, однако это потребует отдельного анализа взаимозависимости показателей.

Базовые и целевые значения KPI должны устанавливаться авиакомпанией или аэропортом с учётом базового года, состава воздушного и наземного парка, маршрутной сети, доступности SAF и инвестиционной программы. Универсальные целевые значения до 2030 года в настоящей работе не предлагаются.

По данным Плана действий Республики Казахстан по сокращению выбросов CO₂ в авиации, в 2022 году выбросы авиационного транспорта составили 1 060,532 тыс. т CO₂-экв. Для международных перевозок в рамках CORSIA в документе приведены значения 832 026 т в 2019 году, 315 805 т в 2020 году, 491 433 т в 2021 году и 648 274 т в 2022 году с оговоркой о последующей верификации. В 2023 году казахстанскими авиакомпаниями было перевезено 13,3 млн пассажиров, а за десять месяцев 2024 года - 12,3 млн пассажиров; парк регулярных перевозчиков насчитывал 102 воздушных судна. Эти данные характеризуют масштаб отрасли и обосновывают необходимость оценки не только абсолютных выбросов, но и показателей интенсивности на единицу транспортной работы [9].

План действий также отражает участие Казахстана в CORSIA, присоединение к программе ICAO ACT-SAF и рассмотрение вопросов готовности аэропортов к использованию SAF. Вместе с тем приведённые отраслевые сведения не являются

источниками параметров сценария таблицы 2. Поэтому формулировка «сценарий, параметризованный для условий Казахстана» заменена на более корректную: «иллюстративный сценарий, рассмотренный в контексте Казахстана».

Стоимость закупки SAF, объёмы его возможного локального производства, сырьевая база, сертификационная готовность и капитальные затраты на инфраструктуру в настоящем исследовании количественно не оцениваются, поскольку для этого требуются отдельное технико-экономическое исследование и верифицированные проектные данные. Поэтому выводы сценарной апробации не интерпретируются как оценка коммерческой готовности производства SAF в Казахстане.

Сценарный расчёт

Из-за отсутствия в открытом доступе полного набора корпоративных данных расчёт выполнен для условного авиаперевозчика. Он не является оценкой деятельности Air Astana, SCAT или другого конкретного оператора. Денежные значения представлены в долларах США исключительно для прозрачности сценария.

Таблица 2 – Исходные параметры иллюстративного сценария

№	Параметр	Значение	Статус
1.	Годовое потребление топлива до проекта	100 000 т	сценарное значение
2.	Цена традиционного топлива	950 долл./т	сценарное значение
3.	Операционная экономия топлива	2,0%	сценарное значение
4.	Доля SAF после экономии	5,0%	сценарное значение
5.	Ценовая премия SAF	300 долл./т	сценарное значение
6.	Сокращение выбросов жизненного цикла SAF	65%	сценарное допущение
7.	Первоначальные инвестиции	3,0 млн долл.	сценарное значение
8.	Экономия технического обслуживания и денежных потерь от задержек	1,30 млн долл./год	сценарное значение
9.	Горизонт и ставка дисконтирования	5 лет; 12%	сценарные параметры
10.	Средняя продолжительность полётно-наземного цикла	120 → 112 мин	сценарное значение
11.	Целевой NPV	5,0 млн долл.	сценарный ориентир
12.	Целевое снижение выбросов	7,0%	сценарный ориентир
13.	Целевое сокращение времени цикла	8,0%	сценарный ориентир
<i>Источник: сценарные допущения авторов. Значения не являются статистическими показателями конкретной компании.</i>			

После операционной оптимизации годовое потребление топлива составляет:
 $100\,000(1-0,02)=98\,000$ т.

Из этого объёма 4 900 т приходится на SAF.

До реализации проекта годовые затраты на топливо составляют:
 $100\,000 \times 950 = 95,00$ млн долл.

После реализации проекта:
 $98\,000 \times 950 + 4\,900 \times 300 = 94,57$ млн долл.

Таким образом, чистая экономия на топливе составляет 0,43 млн долл. в год.

С учётом экономии на техническом обслуживании и денежных потерь от задержек годовой денежный поток равен:

$$CF = 100\,000 \times 0,02 \times 950 - 4\,900 \times 300 + 1\,300\,000$$

$$CF = 1\,730\,000 \text{ долл./год.}$$

При первоначальных инвестициях 3,0 млн долл., горизонте пять лет и ставке дисконтирования 12%:

$$NPV = -3\,000\,000 + 1\,730\,000 \sum_{t=1}^5 \frac{1}{(1+0,12)^t}$$

Получаем:

$$NPV \approx 3,24 \text{ млн долл.}$$

Расчёт предполагает отсутствие дополнительных регулярных затрат проекта. В корпоративном технико-экономическом обосновании они должны быть включены в денежный поток.

Экологический и операционный результаты

По формуле (5):

$$\Delta GHG = 1 - (1 - 0,02)[(1 - 0,05) + 0,05(1 - 0,65)].$$

Следовательно:

$$\Delta GHG = 0,05185,$$

или 5,19%.

Средняя продолжительность полётно-наземного цикла сокращается со 120 до 112 мин:

$$\Delta T = (120 - 112) / 120 = 0,0667.$$

то есть на 6,67%.

Для нормирования заранее установлены три иллюстративные цели:

- NPV - 5,0 млн долл.;
- снижение выбросов - 7,0%;
- сокращение времени цикла - 8,0%.

Эти значения не являются отраслевыми нормативами. Они используются исключительно для демонстрации алгоритма.

Полученные нормированные значения составляют:

$$Z_e = \frac{3,24}{5,0} = 0,647$$

$$Z_{env} = \frac{5,19}{7,0} = 0,741$$

$$Z_o = \frac{6,67}{8,0} = 0,833$$

При равных весах:

$$Z_{env} = \frac{0,647 + 0,741 + 0,833}{3} = 0,740$$

Следовательно, интегральный показатель составляет 0,740, или 74,0% от совокупности трёх заданных целей. Он не означает сокращение экологического воздействия на 74%.

Анализ чувствительности к весам

Таблица 3 – Чувствительность интегрального индекса к весам

№	Сценарий весов	w_e	w_{env}	w_o	E_{greenv}
1.	Равные приоритеты	0,333	0,333	0,333	0,740
2.	Экономический приоритет	0,500	0,300	0,200	0,713

3.	Экологический приоритет	0,200	0,600	0,200	0,741
4.	Операционный приоритет	0,200	0,200	0,600	0,778
<i>Источник: расчёты авторов</i>					

В четырёх рассмотренных системах весов интегральный показатель изменяется от 0,713 до 0,778. Это показывает чувствительность результата к системе приоритетов. Вместе с тем такая проверка не заменяет анализа неопределённости исходных ценовых и инвестиционных параметров.

Чувствительность NPV к цене SAF

Таблица 4 – Чувствительность NPV к ценовой премии SAF

№	Сценарий	Премия SAF, долл./т	Годовой денежный поток, млн долл.	NPV, млн долл.
1	Без премии	0	3,20	8,54
2	Базовый	300	1,73	3,24
3	Высокая премия	500	0,75	–0,30
<i>Источник: расчёты авторов; изменяется только ценовая премия SAF.</i>				

Расчёты выполнены без учёта налогов, инфляции, валютных колебаний, изменения базовой цены авиационного топлива, остаточной стоимости инвестиций и возможных затрат на приобретение углеродных единиц. Поэтому полученные результаты характеризуют базовый сценарий и не заменяют корпоративное технико-экономическое обоснование проекта.

При прочих неизменных параметрах порог безубыточности по ценовой премии SAF составляет около 483 долл./т. При превышении этого уровня NPV становится отрицательной, поэтому решение о масштабировании SAF должно опираться на контрактную цену и сертифицированный показатель жизненного цикла (рис.1).

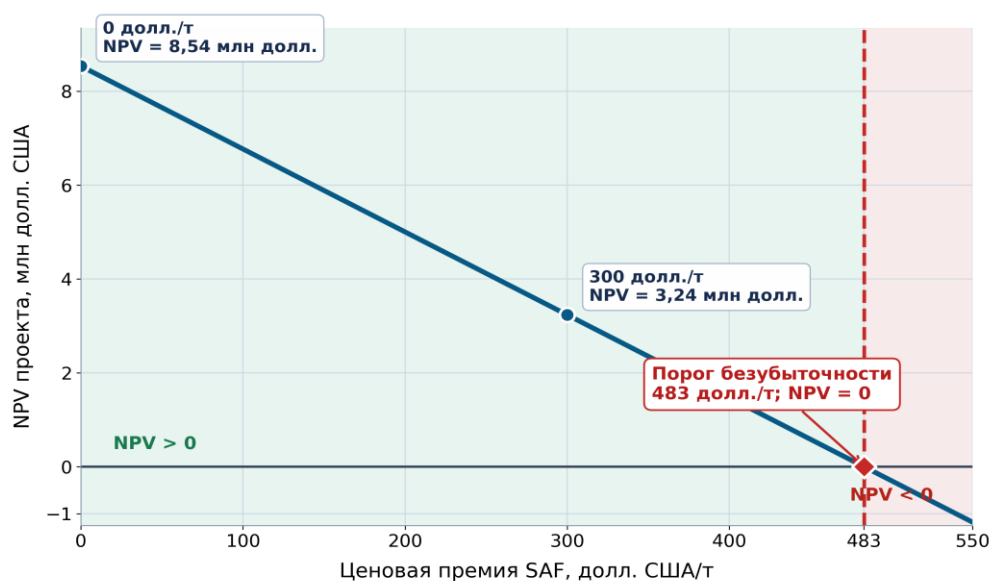


Рисунок 1 – Чувствительность NPV к ценовой премии SAF

Источник: расчёты авторов по параметрам иллюстративного сценария.

Предлагаемая процедура основана на методах, применяемых в исследованиях зелёной логистики, декарбонизации авиации, оценки климатического воздействия и построения составных индикаторов. В отличие от исследований, ориентированных преимущественно на отдельные технологии снижения выбросов или оценку климатического воздействия, в предлагаемой процедуре одновременно учитываются экономический результат проекта (NPV), сокращение выбросов жизненного цикла и операционный показатель. Методология составных индикаторов используется для нормирования разноразмерных показателей и их агрегирования, а метод анализа иерархий рассматривается как возможный инструмент определения весов. При этом сами математические методы нормирования и взвешивания не заявляются как научно новые [11].

Отличительной особенностью предлагаемой процедуры является их адаптация к предварительному отбору проектов зелёной авиационной логистики. Процедура предусматривает формирование паспорта KPI с указанием показателя, источника данных, периодичности мониторинга и ответственного подразделения; целевое нормирование показателей; фиксацию весов до выполнения расчёта; отдельную проверку финансовой приемлемости проекта и анализ чувствительности интегрального результата к весам и ценовой премии SAF. В отличие от общих методик составных индикаторов, процедура ориентирована на использование корпоративных данных авиакомпания или аэропорта и допускает последующую замену сценарных параметров верифицированными фактическими данными. Таким образом, заявляемая новизна относится к отраслевой адаптации и объединению известных методов в единую управленческую процедуру, а не к созданию новых математических методов.

Исследование имеет пять основных ограничений.

Во-первых, расчётная апробация основана на сценарных параметрах, а не на раскрытых корпоративных данных конкретного перевозчика или аэропорта. Поэтому полученные значения NPV, сокращения выбросов и операционного эффекта нельзя интерпретировать как фактически достигнутые результаты предприятия.

Во-вторых, сценарий не учитывает в полном объёме инфляцию, изменение валютного курса, динамику базовой цены авиационного топлива, стоимость углеродных единиц, налогообложение, остаточную стоимость оборудования и возможные дополнительные эксплуатационные расходы.

В-третьих, значение 65% для сокращения выбросов жизненного цикла SAF является сценарным допущением. Для практического применения необходимы данные конкретного топливного пути и подтверждённое значение жизненного цикла в соответствии с применимой методологией CORSIA.

В-четвёртых, экологический блок ограничен преимущественно выбросами парниковых газов и не охватывает в полном объёме не-СО₂-климатические эффекты, шум, качество атмосферного воздуха, водопотребление, отходы и биоразнообразие [12].

В-пятых, интегральный индекс зависит от установленных корпоративных целей и весов. Поэтому он предназначен прежде всего для сопоставления проектов внутри одной системы управления и не должен использоваться как универсальный рейтинг разных авиакомпаний или аэропортов.

Полноценная эмпирическая апробация должна проводиться на верифицированных данных конкретного оператора за базовый и последующие периоды. Для этого необходимы фактические данные о расходе топлива, налёте, транспортной работе, закупках SAF, финансовых потоках, продолжительности операций и соответствующих экологических показателях.

Заключение.

В исследовании разработана процедура комплексной оценки проектов зелёной авиационной логистики, объединяющая экономический, экологический и операционный

результаты. Основу процедуры составляют расчёт NPV, оценка сокращения выбросов жизненного цикла, измерение операционного эффекта, целевое нормирование и агрегирование с заранее заданными весами.

Для регулярного мониторинга предложена система из восьми KPI. При этом для интегрального индекса используются три агрегированных результата — экономический, экологический и операционный. Такое разделение позволяет избежать двойного учёта взаимосвязанных показателей и одновременно сохранить расширенную систему корпоративного мониторинга.

Сценарная апробация на условном авиаперевозчике, рассмотренном в контексте Казахстана, показала, что при 2%-ной экономии топлива, 5%-ной доле SAF и сценарном сокращении выбросов жизненного цикла SAF на 65% сокращение выбросов составляет 5,19%. При инвестициях 3,0 млн долл. США, горизонте пять лет и ставке дисконтирования 12% NPV составляет 3,24 млн долл. США. Средняя продолжительность полётно-наземного цикла сокращается на 6,67%. При равных весах интегральный индекс равен 0,740.

Анализ чувствительности показал изменение индекса от 0,713 до 0,778 при четырёх наборах весов. При этом экономическая устойчивость сценария существенно зависит от цены SAF: при ценовой премии около 483 долл./т NPV достигает нулевого значения при прочих неизменных условиях.

Научный вклад работы состоит не в разработке новых математических методов нормирования или взвешивания, а в их адаптации к предварительному отбору проектов зелёной авиационной логистики и объединении с системой отраслевых KPI.

Практическое применение модели возможно для предварительной оценки инвестиционных и экологических проектов авиакомпаний и аэропортов. Однако проведённый расчёт является сценарной апробацией алгоритма и не подтверждает фактический эффект внедрения у конкретного предприятия.

Дальнейшая проверка должна проводиться на верифицированных корпоративных данных с фиксацией базового периода, фактических денежных потоков, параметров топлива и SAF, операционных KPI и экологических результатов. Это позволит перейти от демонстрации работоспособности расчётного алгоритма к эмпирической оценке его применимости в управлении устойчивым развитием гражданской авиации Казахстана.

Список литературы:

1. Моррелл П. С., Кляйн Т. Перевозка грузов воздушным транспортом: экономика международных авиационных грузоперевозок. 2-е изд. Лондон; Нью-Йорк: Routledge, 2019. 384 с. ISBN 978-1-138-74549-0.
2. Международная ассоциация воздушного транспорта. Резолюция о приверженности авиационной отрасли достижению нулевых нетто-выбросов углерода к 2050 году [Электронный ресурс]. Бостон: IATA, 2021. URL: <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/iata-agm-resolution-on-net-zero-carbon-emissions.pdf> (дата обращения: 25.09.2026).
3. Международная организация гражданской авиации. CORSIA: Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation; CORSIA Eligible Fuels [Электронный ресурс]. URL: <https://www.icao.int/CORSIA>; <https://www.icao.int/CORSIA/corsia-eligible-fuels> (дата обращения: 25.09.2026).
4. Мак-Киннон А., Браун М., Печик М., Уайтинг А., ред. Зелёная логистика: повышение экологической устойчивости логистической деятельности. 3-е изд. Лондон: Kogan Page, 2015. 448 с.
5. Международная организация гражданской авиации. Экологический доклад ИКАО 2022: инновации для перехода к зелёной экономике [Электронный ресурс]. Монреаль: ICAO, 2022. URL: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2022.aspx> (дата обращения: 25.09.2026).

6. Авиационная администрация Казахстана. План действий Республики Казахстан по сокращению выбросов CO₂ в авиации [Электронный ресурс]. Астана, 2024. 48 с. URL: <https://caa.gov.kz/storage/app/media/department-sus-dev/SAP%20KZ.pdf> (дата обращения: 25.09.2026).

7. Бауэн А., Битосси Н., Джерман Л., Харрис А., Леоу К. Устойчивое авиационное топливо: современное состояние, проблемы и перспективы применения взаимозаменяемых жидких топлив, водорода и электрификации в авиации // *Johnson Matthey Technology Review*. 2020. Т. 64, № 3. С. 263–278. DOI: 10.1595/205651320X15816756012040.

8. Ли Д. С., Фэйхи Д. У., Скоурон А. и др. Вклад мировой авиации в антропогенное климатическое воздействие за период с 2000 по 2018 год // *Atmospheric Environment*. 2021. Т. 244. Ст. 117834. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834.

9. Бюро национальной статистики Республики Казахстан. Транспорт в Республике Казахстан: официальная статистика [Электронный ресурс]. URL: <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-transport> (дата обращения: 25.09.2026).

10. Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года: Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121 [Электронный ресурс]. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121> (дата обращения: 25.09.2026).

11. Шефер А. В., Барретт С. Р. Х., Дойм К. и др. Технологические, экономические и экологические перспективы полностью электрических воздушных судов // *Nature Energy*. 2019. Т. 4. С. 160–166. DOI: 10.1038/s41560-018-0294-x.

12. OECD; European Commission; Joint Research Centre. Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. Paris: OECD Publishing, 2008. 162 p. DOI: 10.1787/9789264043466-en.

References

1. Morrell, P. S., & Klein, T. *Moving Boxes by Air: The Economics of International Air Cargo*. 2nd ed. London; New York: Routledge, 2019. 384 p. ISBN 978-1-138-74549-0.

2. International Air Transport Association. *Resolution on the Industry's Commitment to Reach Net Zero Carbon Emissions by 2050* [Electronic resource]. Boston: IATA, 2021. Available at: <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/iata-agm-resolution-on-net-zero-carbon-emissions.pdf> (accessed September 25, 2026).

3. International Civil Aviation Organization. *CORSIA: Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation; CORSIA Eligible Fuels* [Electronic resource]. Available at: <https://www.icao.int/CORSIA>; <https://www.icao.int/CORSIA/corsia-eligible-fuels> (accessed September 25, 2026).

4. McKinnon, A., Browne, M., Piecyk, M., & Whiteing, A., eds. *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics*. 3rd ed. London: Kogan Page, 2015. 448 p.

5. International Civil Aviation Organization. *ICAO Environmental Report 2022: Innovation for a Green Transition* [Electronic resource]. Montreal: ICAO, 2022. Available at: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2022.aspx> (accessed September 25, 2026).

6. Aviation Administration of Kazakhstan. *Action Plan of the Republic of Kazakhstan for the Reduction of CO₂ Emissions from Aviation* [Electronic resource]. Astana, 2024. 48 p. Available at: <https://caa.gov.kz/storage/app/media/department-sus-dev/SAP%20KZ.pdf> (accessed September 25, 2026).

7. Bauen, A., Bitossi, N., German, L., Harris, A., & Leow, K. Sustainable aviation fuels: Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation. *Johnson Matthey Technology Review*. 2020. Vol. 64, No. 3. Pp. 263–278. DOI: [10.1595/205651320X15816756012040](https://doi.org/10.1595/205651320X15816756012040).

8. Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 244. Article 117834. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2020.117834](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834).
9. Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan. *Transport in the Republic of Kazakhstan: Official Statistics* [Electronic resource]. Available at: <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-transport> (accessed September 25, 2026).
10. President of the Republic of Kazakhstan. *On Approval of the Strategy for Achieving Carbon Neutrality of the Republic of Kazakhstan by 2060: Decree No. 121 dated February 2, 2023* [Electronic resource]. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121> (accessed September 25, 2026). [In Russian].
11. Schäfer, A. W., Barrett, S. R. H., Doyme, K., et al. Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft. *Nature Energy*. 2019. Vol. 4. Pp. 160–166. DOI: [10.1038/s41560-018-0294-x](https://doi.org/10.1038/s41560-018-0294-x).
12. OECD, European Commission, & Joint Research Centre. *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. Paris: OECD Publishing, 2008. 162 p. DOI: [10.1787/9789264043466-en](https://doi.org/10.1787/9789264043466-en).

ӘУЕ ТАСЫМАЛДАРЫН ҰЙЫМДАСТЫРУДАҒЫ «ЖАСЫЛ» ЛОГИСТИКА ЭКОНОМИКАСЫ

Аңдатпа. Зерттеудің мақсаты – авиациядағы жасыл логистика жобаларының экономикалық, экологиялық және операциялық нәтижелілігін кешенді бағалаудың қайта жаңғыртылатын тәсілін әзірлеу және оның Қазақстан контекстінде қарастырылған иллюстрациялық сценарийде қолданылуын көрсету. Зерттеудің ақпараттық базасын Халықаралық әуе көлігі қауымдастығының (IATA), Халықаралық азаматтық авиация ұйымының (ICAO), Қазақстан Республикасы Ұлттық статистика бюросының және Қазақстанның Авиациялық әкімшілігінің ресми құжаттары, нормативтік құқықтық актілер мен рецензияланатын ғылыми жарияланымдар құрады. Әдістеме таза келтірілген құнды (Net Present Value, NPV) есептеуді, парниктік газдар шығарындыларының өмірлік цикл бойынша қысқаруын бағалауды, операциялық нәтижені өлшеуді, жекелеген көрсеткіштерді нысаналы қалыпқа келтіруді және оларды белгіленген салмақтар бойынша біріктіруді қамтиды. Мониторинг жүргізу үшін тиімділіктің сегіз негізгі көрсеткішінен (Key Performance Indicators, KPI) тұратын жүйе ұсынылды. Олардың ішінен демонстрациялық интегралдық индексте үш жиынтық нәтиже: экономикалық, экологиялық және операциялық нәтижелер пайдаланылады. Шартты әуетасымалдаушыға арналған сценарийлік есептеуде отынның 2%-дық үнемі, тұрақты авиациялық отынның (Sustainable Aviation Fuel, SAF) 5%-дық үлесі және SAF-тың өмірлік циклі бойынша шығарындыларды 65%-ға қысқарту туралы сценарийлік болжам жағдайында шығарындылардың азаюы 5,19%-ды, NPV 3,24 млн АҚШ долларын, ал ұшу-жерүсті циклі орташа ұзақтығының қысқаруы 6,67%-ды құрады. Салмақтар тең болған жағдайда интегралдық индекс 0,740-қа тең болды. Қарастырылған төрт салмақ жүйесінде индекс мәні 0,713–0,778 аралығында өзгерді. NPV-дің SAF бағалық үстемеақысына сезімталдығын талдау өзге параметрлер өзгеріссіз қалған жағдайда залалсыздық шегінің шамамен 483 АҚШ долл./т деңгейінде екенін көрсетті. Зерттеудің ғылыми жаңалығы құрама индикаторлар әдіснамасын жасыл авиациялық логистика жобаларын алдын ала іріктеу міндетіне салалық бейімдеуден тұрады. Зерттеудің шектеуі есептік деректердің корпоративтік емес, сценарийлік сипатымен байланысты; енгізудің нақты тиімділігін бағалау үшін ұсынылған тәсілді нақты авиакомпанияның немесе әуежайдың верификацияланған деректері негізінде кейіннен сынақтан өткізу қажет.

Түйін сөздер: жасыл логистика, авиациялық тасымалдар, экономикалық тиімділік, тұрақты авиациялық отын, SAF, тиімділіктің негізгі көрсеткіштері, KPI, таза келтірілген құн, NPV, парниктік газдар шығарындылары, CORSIA, декарбонизация.

THE ECONOMICS OF «GREEN» LOGISTICS IN THE ORGANIZATION OF AIR TRANSPORTATION

Abstract. This study aims to develop a reproducible approach to the comprehensive assessment of the economic, environmental, and operational performance of green logistics projects in aviation and to demonstrate its application using an illustrative scenario considered in the context of Kazakhstan. The information base comprises official documents of the International Air Transport Association (IATA), the International Civil Aviation Organization (ICAO), the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan, and the Aviation Administration of Kazakhstan, as well as regulatory legal acts and peer-reviewed scientific publications. The methodology includes the calculation of net present value (NPV), the assessment of life-cycle greenhouse gas emission reductions, the measurement of operational performance, the target-based normalization of individual indicators, and their aggregation using predefined weights. A system of eight key performance indicators (KPIs) is proposed for monitoring purposes. Three aggregated outcomes—economic, environmental, and operational—are used to construct the illustrative composite index. In the scenario calculation for a hypothetical air carrier, a 2% reduction in fuel consumption, a 5% share of sustainable aviation fuel (SAF), and an assumed 65% reduction in the life-cycle emissions of SAF resulted in a 5.19% reduction in emissions, an NPV of USD 3.24 million, and a 6.67% reduction in the average flight–ground cycle time. With equal weights, the composite index was 0.740. Across the four weighting schemes considered, the index ranged from 0.713 to 0.778. The sensitivity analysis of NPV to the SAF price premium indicated a break-even threshold of approximately USD 483 per tonne, with all other parameters held constant. The scientific novelty of the study lies in adapting the composite indicator methodology to the preliminary screening of green aviation logistics projects. The study is limited by the scenario-based rather than corporate nature of the input data; therefore, the actual effectiveness of implementation must subsequently be validated using verified data from a specific airline or airport.

Keywords: green logistics, air transportation, economic efficiency, sustainable aviation fuel, SAF, key performance indicators, KPI, net present value, NPV, greenhouse gas emissions, CORSIA, decarbonization.

Сведение об авторах

Калиева Гүлжан Көктеубаевна	К.э.н., ассоциированный профессор кафедры «Организация авиационных перевозок и логистики», Академия гражданской авиации, г. Алматы, Казахстан. E-mail: g.kaliyeva@agakaz.kz
Алтаева Гүлмира Орынбаевна	Доктор PhD, E-mail: Altaeva.Gulmira@mail.ru
Конакбай Зарина Еркінбековна	К.т.н., ассоциированный профессор, заведующий кафедры «Организация авиационных перевозок и логистики», Академия гражданской авиации, г. Алматы, Казахстан., E-mail: z.konakbai@agakaz.kz
Альчымбаева Айгерим Султановна	Магистр, сениор – лектор кафедры «Транспортное строительство», Академия логистики и транспорта, г. Алматы, Казахстан. E-mail: aigerim-kaz@mail.ru

Авторлар туралы мәлімет

Калиева Гүлжан Көктеубайқызы	Экономика ғылымдарының кандидаты, «Әуе тасымалдарын ұйымдастыру және логистика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Азаматтық авиация академиясы, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: g.kaliyeva@agakaz.kz.
---------------------------------	---

Алтаева Гүлмира Орынбайқызы	PhD докторы, E-mail: Altaeva.Gulmira@mail.ru
Қонақбай Зарина Еркінбекқызы	Техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Әуе тасымалдарын ұйымдастыру және логистика» кафедрасының меңгерушісі, Азаматтық авиация академиясы, Алматы қ., Қазақстан. E-mail: z.konakbay@agakaz.kz.
Алчимбаева Айгерім Сұлтанқызы	Магистр, «Көлік құрылысы» кафедрасының аға оқытушысы, Логистика және көлік академиясы, Алматы қ., Қазақстан. E-mail: aigerim-kaz@mail.ru.

Information about the authors

Gulzhan Kokteubayevna Kaliyeva	Candidate of Economic Sciences, Associate Professor at the Department of Air Transport Organization and Logistics, Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan, E-mail: g.kaliyeva@agakaz.kz
Gulmira Orynbaykyzy Altayeva	PhD, E-mail: Altaeva.Gulmira@mail.ru
Zarina Yerkinbekovna Konakbai	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Air Transport Organization and Logistics, Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan, E-mail: z.konakbai@agakaz.kz.
Aigerim Sultanovna Alchimbayeva	Master's Degree holder, Senior Lecturer at the Department of Transport Construction, Academy of Logistics and Transport, Almaty, Kazakhstan, E-mail: aigerim-kaz@mail.ru.



УДК 623.76

МРНТИ 47.41.00

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_7

А.А. Аишев^{1*}, Н.Б. Зикирьяев¹, Е.О. Досжанов², Г.Р. Нысанбаева³

¹ Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи,
г. Алматы, Казахстан

² Farabi University, г. Алматы, Казахстан

³ Академия Гражданской Авиации, г. Алматы, Казахстан

*E-mail: aievaskar@gmail.com

МЕТОДЫ ПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ

Аннотация. В работе исследуются подходы к определению углового положения объектов посредством установления направления распространения радиоволн, поступающих от источников радиоизлучения или формируемых в результате отражения от объектов. Исследование выполняется в рамках грантового финансирования научно-технического проекта «Разработка аппаратно-программного комплекса для задач пассивной пеленгации источников радиоизлучения ЛА на основе технологии искусственного интеллекта» (договор №332/23-25 от 03.10.2025 г., проект №АР 327016/0225). Проведение исследований также осуществляется в соответствии с решением первого заместителя Министра обороны Вооруженных Сил Республики Казахстан - начальника Генерального штаба Вооруженных Сил Республики Казахстан от 18 ноября 2023 года №62-3-4068. В рамках указанного направления на кафедре основ военной радиотехники и электроники проводится комплексное изучение современных методов пассивного определения направления на источники радиоизлучения. В современной радиопеленгации важной задачей остается точное и оперативное определение угловых координат источников радиоизлучения, включая активные средства постановки помех. Для этого необходимо найти компромисс между точностью измерений, однозначностью привязки и помехоустойчивостью оборудования в сложных условиях многолучевого распространения. В данной работе проводится сравнительный теоретический анализ амплитудных и фазовых методов пеленгования с целью систематизации их технических ограничений и поиска путей их преодоления. С использованием методов математического анализа радиотехнических систем и аналитического обобщения специализированной литературы проведена оценка зависимости чувствительности аппаратуры от геометрии антенных систем. Дополнительно проведено численное моделирование фазового метода пеленгации методом Монте-Карло с варьированием отношения d/λ , отношения сигнал/шум и угла прихода сигнала. Анализ показывает, что классический метод максимума амплитуды обладает низкой чувствительностью к пеленгованию. Фазовые методы, напротив, обеспечивают более высокую точность, однако по мере увеличения расстояния между антеннами они сталкиваются с проблемой неоднозначности пеленга. В результате проведенной работы сделан вывод о том, что для достижения необходимой точности и однозначности измерений наиболее целесообразно использовать комбинированные многоканальные подходы. Кроме того, внедрение современных алгоритмов цифровой обработки сигналов

(например, алгоритма MUSIC) и использование адаптивных антенных решеток могут компенсировать влияние дестабилизирующих факторов многолучевости.

Ключевые слова: амплитудная пеленгация, фазовая пеленгация, зона обнаружения, постановщик активных помех, сигнал, пеленг, помехозащищенность.

Введение.

Для определения направления на источник радиочастотного излучения применяются различные радиотехнические методы. В случае, когда угловое положение объекта устанавливается на основании изменения амплитуды сигнала, поступающего на приемное устройство, данный подход относят к амплитудным методам пеленгации. Изменение уровня принимаемого сигнала при этом обусловлено направленными характеристиками антенных систем. Другую группу составляют фазовые методы, в которых информация о направлении на источник излучения определяется по фазовым соотношениям сигналов, поступающих на пространственно разнесенные антенные элементы. Использование фазовой разности между принимаемыми сигналами позволяет определить угловое положение источника относительно антенной системы. В современной радиопеленгации ключевой задачей является точное и оперативное определение угловых координат (направления) на источники радиоизлучения, включая постановщики активных шумовых помех. Существующие классические методы пеленгации - амплитудный и фазовый - имеют ряд принципиальных технических ограничений, снижающих их эффективность в реальных условиях [1]:

Специфика пеленгации именно постановщиков активных шумовых помех заключается в физической природе их излучения. Такие источники формируют непрерывный шумовой или шумоподобный сигнал высокой мощности, что приводит к работе измерительного тракта пеленгатора в условиях экстремально низкого (зачастую отрицательного) отношения сигнал/шум (SNR). В отличие от пеленгации связных или радиолокационных сигналов, где возможно накопление полезного сигнала, мощная активная помеха маскирует амплитудные и фазовые различия на разнесенных антеннах, что существенно снижает устойчивость системы к флуктуационным ошибкам.

Для амплитудных методов: главным дестабилизирующим фактором является многолучевое распространение радиосигнала (отражения от рельефа, зданий и атмосферы), которое искажает измеряемые амплитуды. Современные исследования подтверждают, что в условиях плотной застройки искажения спектра требуют применения цифровых корреляционно-интерферометрических методов для восстановления аналитического сигнала [2]. Также методы критичны к уровню шумов, геометрии антенн и стабильности приемного тракта. Отдельные модификации (метод максимума) обладают низкой пеленгационной чувствительностью из-за сглаженной формы диаграммы направленности.

Для фазовых методов: основной проблемой выступает необходимость жесткой временной и фазовой синхронизации приемных каналов. Кроме того, возникает внутреннее противоречие: для повышения точности необходимо увеличивать базу между антеннами d/λ , однако это приводит к сужению диапазона однозначного измерения углов и возникновению двужначности пеленга.

Следует подчеркнуть, что хотя выполняемый научно-технический проект в целом направлен на создание комплекса с использованием технологий искусственного интеллекта, настоящая работа посвящена исключительно базовому физико-математическому анализу классических измерительных трактов. Вопросы выбора архитектуры нейросетей, алгоритмов машинного обучения, формирования датасетов и их экспериментальной реализации полностью выходят за рамки данной статьи.

Таким образом, существует научно-техническая проблема поиска компромисса между точностью пеленгации, однозначностью отсчета угловых координат и

помехозащищенностью систем в условиях многолучевого распространения волн и нестабильности параметров оборудования.

В статье отмечается, что базовые теоретические и практические аспекты амплитудных и фазовых методов пеленгации подробно исследованы в классических трудах по радионавигации и радиолокации [3-6].

В современной литературе (в частности, в работах [7-8]) активно рассматриваются вопросы повышения пеленгационной чувствительности и устранения неоднозначности измерений. Исследования развиваются по двум основным направлениям:

Модернизация антенных систем и аппаратной части: рассмотрены методы введения фазовращателей на угол $\frac{\pi}{2}$ для превращения пеленгационной характеристики в нечетную функцию, а также применение многоканальных (многобазовых) и моноимпульсных систем.

Алгоритмические методы (цифровая обработка): в качестве передовых подходов упоминаются современные пространственно-временные алгоритмы оценки направления прихода сигнала (в частности, алгоритм MUSIC - Multiple Signal Classification), методы адаптивной фильтрации и комплексирование данных с нескольких распределенных приемных станций (мультипеленгация и трилатерация). Сравнительный анализ показывает, что алгоритмы подпространства (такие как MUSIC и Beamscan) обеспечивают существенно более высокую разрешающую способность при оценке направления прихода сигнала (DoA) по сравнению с классическими методами [9].

В последние годы для решения проблемы снижения точности пеленга в условиях низкого отношения сигнал/шум (SNR) и многолучевости активно внедряются архитектуры глубокого обучения (Deep Learning) [10]. Современные исследования показывают, что нейросетевые модели способны эффективно извлекать пространственные признаки из ковариационных матриц и напрямую восстанавливать угловые координаты даже при малом числе отсчетов [11]. В частности, использование сверточных сетей и гибридных архитектур позволяет алгоритмически устранять влияние коррелированных источников и шумовых флуктуаций, демонстрируя повышенную робастность по сравнению с классическими методами подпространства в сложной электромагнитной обстановке [12].

Элементы научной новизны данного исследования заключаются в следующем: во-первых, проведено количественное (численное) моделирование уязвимости классического фазового метода пеленгации к условиям экстремально низкого отношения сигнал/шум, характерного именно для прямого воздействия активных шумовых помех; во-вторых, на основе систематизации выявленных ограничений предложена концептуальная архитектура комбинированного аппаратно-программного комплекса, формирующая физико-математический базис для последующего комплексирования классических измерительных трактов с алгоритмами машинного обучения.

Цель работы - провести сравнительный теоретический анализ амплитудных и фазовых методов радиопеленгации, определить математические зависимости их пеленгационной чувствительности и точности от геометрии антенных систем, а также дополнить теоретические положения численным моделированием фазового метода для оценки влияния отношения d/λ , отношения сигнал/шум и угла прихода сигнала на точность и однозначность определения направления.

Материалы и методы исследования.

Амплитудные методы пеленгации. Амплитудные способы определения направления на источник радиоизлучения используют зависимость уровня принимаемого сигнала от углового положения источника относительно антенной системы [6]. В простейшем случае направленные характеристики формируются только приемной антенной. Если ее диаграмма направленности обозначена как $f_{\text{пр}}(\alpha)$, пеленгационная характеристика радиопеленгатора может быть представлена следующим образом:

$$U(\alpha) = kf_{\text{пр}}(\alpha), \quad (1)$$

где k - коэффициент пропорциональности.

В случае, когда направленные свойства присущи одновременно передающей и приемной антеннам, пеленгационная характеристика определяется с учетом диаграмм направленности обеих антенн: $U(\alpha) = kf_{\text{пр}}(\alpha)f_{\text{прд}}(\alpha)$,

где $f_{\text{прд}}(\alpha)$ - диаграмма направленности передающей антенны. Если одна и та же антенна используется как для передачи, так и для приема сигнала, выражение принимает соответствующий вид:

$$f_{\text{прд}}(\alpha) = f_{\text{пр}}(\alpha) = f(\alpha) \text{ значит: } U(\alpha) = kf^2(\alpha). \quad (2)$$

Амплитудная пеленгация. Принцип работы. Амплитудный способ определения направления предполагает использование антенной системы, состоящей из двух или нескольких разнесенных приемных антенн. При поступлении радиосигнала на антенные элементы формируются сигналы, уровни которых зависят от положения источника относительно диаграмм направленности антенн. Для определения направления анализируется разность амплитуд сигналов, принятых отдельными антеннами. При известной пространственной базе между антеннами и определенной разности уровней принимаемых сигналов направление на источник радиоизлучения устанавливается посредством соответствующих геометрических и тригонометрических зависимостей.

Преимущества. К основным преимуществам амплитудной пеленгации относятся сравнительно простая техническая реализация и отсутствие жестких требований к высокоточной синхронизации отдельных приемных каналов. Это позволяет создавать относительно простые многоканальные системы определения направления.

Проблемы и ограничения. Одним из наиболее существенных факторов, ограничивающих точность амплитудной пеленгации, является многолучевое распространение радиоволн. При взаимодействии радиосигнала с поверхностью земли, зданиями, элементами рельефа и неоднородностями атмосферы в приемную систему могут поступать сигналы, распространяющиеся по различным траекториям. Интерференция прямого и отраженных сигналов изменяет их амплитудные характеристики и, как следствие, приводит к ошибкам при определении направления.

Дополнительным условием надежной работы метода является высокая точность измерения амплитуды принимаемых сигналов. Шумы, внешние электромагнитные помехи и нестабильность параметров приемного тракта способны существенно ухудшать результаты измерений. На точность пеленгации также оказывают влияние рабочая частота, взаимное расположение антенных элементов, их ориентация, поляризация принимаемого сигнала и отношение сигнал/шум. Следует учитывать и геометрические параметры антенной системы. Погрешности определения расстояния между антеннами, а также отклонения их фактической ориентации от расчетного положения непосредственно сказываются на точности вычисления угловой координаты источника.

Применительно к задаче обнаружения активных шумовых помех главным ограничением амплитудного метода становится энергетическая маскировка. Поскольку постановщик помех целенаправленно перекрывает рабочий диапазон частот мощным белым или окрашенным шумом, выделение незначительной разности амплитуд на фоне высокого уровня внешнего шума требует неприемлемо большого времени усреднения. Это лишает систему оперативности и значительно снижает эффективность классического метода максимума в условиях радиопротиводействия.

Фазовая пеленгация. Принцип работы. В отличие от амплитудного способа, фазовый метод основан на анализе фазовых характеристик сигналов, принимаемых несколькими

пространственно разнесенными антеннами. В наиболее распространенной схеме применяются две или более приемные антенны, сигналы которых поступают на фазосравнительное устройство. Основным измеряемым параметром является фазовый сдвиг между сигналами. Фазовый детектор преобразует разность фаз в выходной электрический сигнал, величина которого определяется фазовым соотношением входных колебаний. При известном расстоянии между антеннами и измеренной разности фаз направление прихода электромагнитной волны относительно антенной базы может быть рассчитано.

Преимущества. Одним из важных достоинств фазового метода является его меньшая зависимость от изменений абсолютного уровня принимаемого сигнала. При соответствующей технической реализации фазовая пеленгация позволяет получать более высокую точность определения углового положения источника по сравнению с амплитудными методами.

Проблемы и ограничения. К основным техническим требованиям фазового метода относится обеспечение высокой точности временного и фазового согласования приемных каналов. Даже небольшие фазовые или временные рассогласования могут приводить к погрешностям при измерении фазового сдвига и, следовательно, к ошибкам определения направления на источник. Точность метода также зависит от условий распространения радиоволн. Многолучевость, параметры и взаимная геометрия антенной системы, стабильность фазосравнительной аппаратуры, рабочая частота и ограниченный диапазон однозначного определения фазовой разности являются факторами, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации фазовых радиопеленгаторов.

В контексте пеленгации активных помех ключевой проблемой фазового метода становится разрушение фазового фронта волны. Мощное шумовое излучение постановщика вызывает интенсивные случайные фазовые флуктуации в пространственно разнесенных приемных каналах. Как показано далее в результатах численного моделирования, падение отношения сигнал/шум до отрицательных значений (что является штатным режимом при подавлении) приводит к резкому росту дисперсии фазовой ошибки, из-за чего фазовый детектор начинает выдавать ложные значения, заметно снижая достоверность пеленга.

Базовый принцип фазового пеленгования обычно заключается в оценке фазового сдвига сигналов, поступающих на пространственно разнесенные приемные элементы [8]. В качестве базовой геометрической модели измерительной системы можно представить две точки приема (условно A и B), физическая дистанция между которыми образует антенную базу длиной d . Как правило, при расчетах полагается, что источник радиоизлучения находится в дальней зоне. При выполнении этого условия падающий электромагнитный фронт можно с достаточной степенью точности рассматривать как плоский.

Из-за того, что электромагнитное излучение проходит неодинаковый путь от целевого источника до каждой из антенн, возникает геометрическая разность хода. Следствием этого эффекта становится регистрируемый фазовый сдвиг φ_p , который вычисляется через разницу дистанций от излучателя до приемных узлов:

$$\varphi_p = \frac{2\pi}{\lambda}(R_A - R_B). \quad (3)$$

где R_A и R_B - расстояния от источника до первой и второй приемных антенн соответственно. Если расстояние до источника значительно превышает величину антенной базы ($R_A \gg d$ и $R_B \gg d$), направления распространения волны к обоим антеннам можно считать практически параллельными. В рамках такой аппроксимации геометрическая связь

между разностью хода волн и углом прихода сигнала обычно выражается как: $R_A \gg d$ и $R_B \gg d$ $\varphi_p = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha$,

где α - угол между нормалью к антенной базе и направлением на источник радиоизлучения.

Измеряя фазовый сдвиг, можно попытаться оценить угол прихода волны с помощью обратной зависимости:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\varphi_p}{2\pi d/\lambda}\right). \quad (4)$$

Здесь видится целесообразным более подробно остановиться на математических и аппаратных ограничениях функции арксинуса в контексте радиопеленгации. Как правило, для получения однозначной и физически достоверной оценки угла прихода сигнала значение измеряемой фазовой разности φ_p должно строго находиться в пределах главного интервала $[-\pi, \pi]$. Если истинная геометрическая разность фаз начинает превышать этот диапазон (что зачастую наблюдается при использовании измерительных баз $d > \lambda/2$ и отклонении источника от нормали), происходит фазовый переход через границы $\pm\pi$. В момент такого перехода измерительный тракт обычно приводит (или «заворачивает») фазу обратно в базовый интервал. Применение формулы (4) к такому приведенному значению, как и ожидается, дает математически допустимый, но физически ложный угол. Именно этот механизм скачкообразного перехода через $\pm\pi$ можно рассматривать как основную причину возникновения фазовой неоднозначности, которая существенно ограничивает сектор обзора при работе с широкобазовыми антенными системами.

Для определения двух угловых координат источника в трехмерном пространстве может применяться дополнительная пара приемных антенн. Совместная обработка результатов измерений в большинстве случаев позволяет определить пространственное направление на источник. В качестве основного фазочувствительного устройства часто используется фазовый детектор. Его выходное напряжение зависит от разности фаз входных сигналов и в общем случае может быть описано косинусоидальной зависимостью:

$$S = k \cos \varphi_p. \quad (5)$$

С учетом зависимости фазы от угла, пеленгационная характеристика фазового радиопеленгатора может быть представлена в следующем виде:

$$U(\alpha) = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha\right). \quad (6)$$

Для малых углов, когда справедливо приближение $\sin(\alpha) \approx \alpha$, видится возможным использовать линейное представление. В этом случае выражение принимает упрощенный вид:

$$U(\alpha) = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \alpha\right). \quad (7)$$

Подобное приближение обычно считается допустимым при нахождении объекта вблизи нормали к антенной базе, однако при больших отклонениях угла погрешность такой аппроксимации может существенно возрастать.

Численная модель и параметры моделирования. Для количественной иллюстрации теоретических зависимостей, рассмотренных выше, было выполнено численное моделирование двухантенной фазовой пеленгационной системы. Моделирование проводилось в программной среде *Python* методом Монте-Карло. В качестве основных

варьируемых параметров рассматривались отношение пространственной базы к длине волны d/λ (выбраны значения 0.25, 0.5, 1.0, 2.0), отношение сигнал/шум (SNR) в диапазоне от -10 до 20 дБ и истинный угол прихода сигнала θ в пределах $\pm 60^\circ$. Для каждой комбинации параметров выполнялось $N = 10000$ независимых реализаций.

В модели фазовая разность между сигналами двух приемных элементов определялась выражением:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin\theta \quad (8)$$

Для учета случайной составляющей измерительной погрешности к рассчитанной фазовой разности добавлялась гауссовская фазовая ошибка. Среднеквадратическое отклонение фазовой ошибки определялось в зависимости от линейного отношения сигнал/шум в соответствии с принятой моделью:

$$\sigma\Delta\varphi = \sqrt{\frac{1}{2SNR_{lin}}} \quad (9)$$

где $SNR_{lin} = 10^{(SNR_{дБ} / 10)}$. После учета шумовой составляющей измеренная фазовая разность приводилась к основному интервалу $[-\pi, \pi]$, после чего направление прихода восстанавливалось по обратной зависимости:

$$\hat{\theta} = \arcsin\left(\frac{\Delta\varphi_{wrap}}{2\pi(d/\lambda)}\right) \quad (10)$$

В качестве итоговой метрики точности использовалась среднеквадратическая ошибка (RMSE) оценки угла:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{\theta}_i - \theta)^2} \quad (11)$$

где $\hat{\theta}$ — оценка угла в i -й реализации, а θ — заданный истинный угол прихода сигнала. Такое представление позволяет непосредственно воспроизвести основное ограничение классического фазового метода: увеличение d/λ повышает чувствительность к изменению угла, но одновременно приводит к фазовой неоднозначности при превышении измеряемой фазовой разностью интервала $[-\pi, \pi]$.

Результаты и их обсуждение.

В зависимости от способа формирования пеленгационной характеристики *амплитудные методы* определения направления подразделяются на методы максимума, минимума и сравнения [6]. При использовании метода максимума направление на источник радиоизлучения определяется в процессе плавного изменения положения диаграммы направленности приемной антенны. Пеленг соответствует такому положению диаграммы, при котором ее максимум α_0 совпадает с направлением на объект α . В этот момент уровень напряжения на выходе приемного устройства достигает наибольшего значения.

Метод максимума эффективен благодаря простой технической реализации и достижению максимального отношения сигнал/шум точно в момент пеленгации [3].

В то же время существенным ограничением данного подхода является относительно невысокая пеленгационная чувствительность, вследствие чего точность определения углового положения источника оказывается ограниченной.

Пеленгационная чувствительность характеризует изменение выходного сигнала радиопеленгатора при небольшом изменении углового положения диаграммы направленности относительно направления на источник. Количественно данный параметр определяется величиной крутизны пеленгационной характеристики:

$$K_{\Pi} = \left| \frac{dU(\alpha)}{d\alpha} \right| \alpha = \alpha_0. \quad (12)$$

Оценить абсолютную погрешность определения угловой координаты можно по следующей формуле, где U — порог чувствительности (минимальный регистрируемый сдвиг) выходного напряжения измерительного тракта:

$$\Delta\alpha \approx \frac{\Delta U}{K_{\Pi}} \quad (13)$$

Следовательно, увеличение крутизны пеленгационной характеристики приводит к повышению чувствительности радиопеленгатора и уменьшению погрешности определения угла [7].

Практическое применение метода максимума ограничивается тем, что вершина диаграммы направленности антенны, как правило, имеет достаточно плавную форму. Поэтому в непосредственной близости от максимума крутизна пеленгационной характеристики невелика, что и обуславливает сравнительно невысокую точность данного метода.

В методе минимума используется диаграмма направленности с ярко выраженным провалом. В процессе изменения ее углового положения определяется момент, когда минимум пеленгационной характеристики совпадает с направлением на источник радиоизлучения [6]. В рассматриваемом положении выходное напряжение приемника принимает минимальное значение. Поскольку в области минимума пеленгационная характеристика обладает большей крутизной, чем вблизи максимума, потенциальная точность определения направления оказывается выше. Однако применение метода связано с определенными ограничениями. Вблизи направления на объект уровень принимаемого сигнала значительно уменьшается, вследствие чего ухудшаются условия его надежного обнаружения и оценки дальности. По этой причине метод минимума преимущественно используется в радионавигационных системах при определении направления на источники, характеризующиеся достаточно высоким уровнем собственного излучения [4].

В методе сравнения угловое положение источника определяется посредством сопоставления амплитуд сигналов, формируемых двумя каналами и соответствующих двум пересекающимся диаграммам направленности $f_1(\alpha)$ и $f_2(\alpha)$. Выходные напряжения соответствующих приемных каналов определяются выражениями:

$$S_1 = k_1 f_1(\alpha_0), \quad S_2 = k_2 f_2(\alpha_0). \quad (14)$$

Для исключения влияния общего уровня принимаемого сигнала целесообразно использовать отношение выходных сигналов. В результате получаем:

$$S = \frac{S_1}{S_2} = \frac{k_1 f_1(\alpha_0)}{k_2 f_2(\alpha_0)}. \quad (15)$$

Экспериментальное определение отношения сигналов S и решение уравнения (15) относительно α_0 позволяют найти искомое направление на источник радиоизлучения.

Существенным преимуществом метода сравнения является возможность оперативного определения направления в относительно широком угловом секторе без необходимости механического перемещения антенной системы [6]. Вместе с тем точность получаемого результата определяется формой используемых диаграмм направленности, их взаимной ориентацией и углом прихода электромагнитной волны.

Частным случаем метода сравнения является *равносигнальный способ пеленгации*, при котором условием определения направления служит равенство амплитуд сигналов двух приемных каналов:

$$S = \frac{S_1}{S_2} = 1. \quad (16)$$

Основным преимуществом равносигнального метода является возможность достижения сравнительно высокой точности определения угловой координаты. Это обусловлено тем, что измерение производится на участке пеленгационной характеристики с достаточно высокой крутизной. Равносигнальный принцип получил широкое применение в автоматических системах сопровождения объектов по угловым координатам. В таких системах в качестве информативного параметра может использоваться не отношение, а разность выходных сигналов двух каналов:

$$S = S_1 - S_2. \quad (17)$$

Полученное рассогласование используется системой управления для корректировки положения антенной системы либо ее диаграммы направленности. Направление корректирующего воздействия определяется знаком величины S . Система стремится уменьшить рассогласование до нулевого значения, вследствие чего равносигнальное направление непрерывно изменяется вслед за перемещением объекта.

Методы сравнения находят применение как в многоканальных радиопеленгаторах, включая моноимпульсные системы, так и в одноканальных устройствах. В многоканальной реализации сигналы сравниваются одновременно, что способствует повышению точности измерений и помехоустойчивости системы. В одноканальном варианте диаграмма направленности периодически изменяется, а сопоставление сигналов осуществляется между отсчетами, полученными в различные моменты времени. Такая структура отличается большей простотой, однако характеризуется более низкой помехоустойчивостью [4].

При использовании симметричной пеленгационной характеристики в окрестности ее $\alpha = 0$ крутизна может быть недостаточной для обеспечения высокой точности определения направления. Кроме того, вследствие четности такой характеристики одному и тому же значению выходного сигнала могут соответствовать два симметричных направления. Это приводит к неоднозначности определения угловой координаты.

Для устранения указанной неоднозначности и повышения чувствительности в один из приемных каналов вводится фазовый сдвиг величиной $\pi/2$. В результате симметрия пеленгационной характеристики нарушается, и она приобретает вид нечетной функции:

$$U(\alpha) = \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}d\alpha\right) \approx \frac{2\pi}{\lambda}d\alpha. \quad (18)$$

Для нахождения крутизны пеленгационной характеристики используется выражение:

$$K_p = \frac{dU(\alpha)}{d\alpha} \Big|_{\alpha=0} = 2\pi \frac{d}{\lambda} \quad (19)$$

Рост отношения d/λ ведет к увеличению пеленгационной чувствительности, что повышает точность определения угловой координаты. Однако увеличение пространственной базы относительно длины волны одновременно приводит к сокращению интервала однозначного определения угла. Для обеспечения однозначного измерения

фазовой разности необходимо выполнение соответствующего условия: $|\varphi_p| < \pi$. Для малых углов данное соотношение принимает упрощенный вид:

$$\varphi_p \approx \frac{2\pi d\alpha}{\lambda}, \quad (20)$$

Вследствие этого диапазон однозначного определения угловой координаты определяется соответствующей зависимостью: $\Delta\alpha_{\max} = \frac{\lambda}{2d}$.

На первом этапе было исследовано влияние отношения d/λ на фазовую характеристику системы (Рис. 1а). При $d/\lambda = 0.25$ зависимость фазовой разности от угла остается однозначной во всем рассматриваемом диапазоне. При $d/\lambda = 0.5$ фазовая разность достигает границы основного интервала $\pm\pi$ при $|\theta| = 90^\circ$, поэтому в рассматриваемом диапазоне углов неоднозначность не возникает, однако дальнейшее увеличение базы приводит к сокращению сектора однозначного измерения. При $d/\lambda = 1.0$ и 2.0 наблюдаются повторяющиеся фазовые переходы, обусловленные приведением фазовой разности к интервалу $[-\pi, \pi]$. Для $d/\lambda = 2.0$ граница основного однозначного сектора составляет:

$$|\theta| \leq \arcsin\left(\frac{1}{\frac{2d}{\lambda}}\right) \approx 14.5^\circ \quad (21)$$

Таким образом, результаты моделирования подтверждают теоретический вывод о существовании компромисса между пеленгационной чувствительностью и диапазоном однозначного измерения.

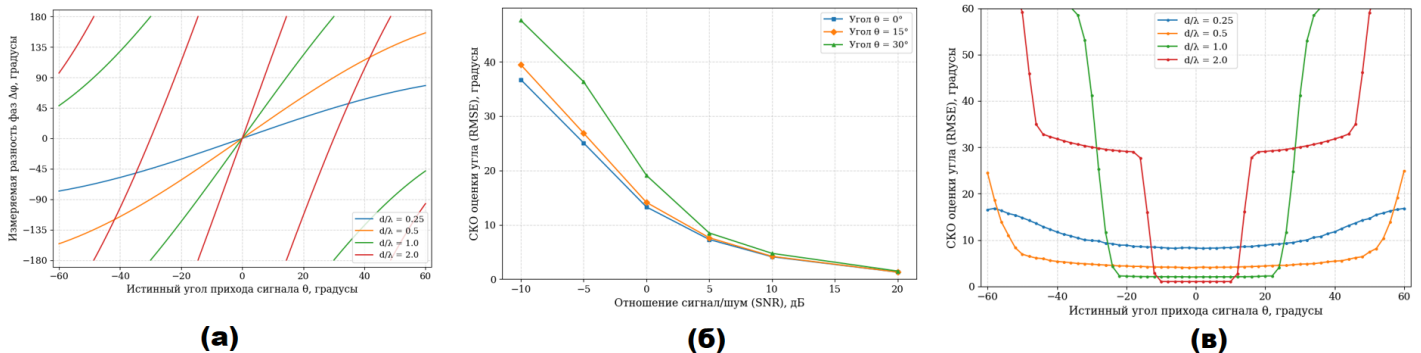


Рисунок 1 – Зависимость измеряемой разности фаз от истинного угла прихода сигнала для различных значений d/λ (а); зависимость среднеквадратической ошибки (RMSE) оценки угла от отношения сигнал/шум при фиксированной базе $d/\lambda = 0.5$ (б); зависимость среднеквадратической ошибки (RMSE) пеленгования от истинного угла прихода при фиксированном $SNR = 10$ дБ (в).

На втором этапе исследовалось влияние отношения сигнал/шум на среднеквадратическую ошибку определения угла ($RMSE$) при фиксированном $d/\lambda = 0.5$ для различных истинных углов прихода сигнала (Рис. 1б). С уменьшением SNR наблюдается закономерное увеличение ошибки пеленгования. Наиболее высокая точность достигается при высоких значениях SNR ; например, при $SNR = 20$ дБ $RMSE$ для $\theta = 0^\circ$ составляет около 1.3° . При $SNR = -10$ дБ ошибка возрастает до нескольких десятков градусов, что количественно подтверждает уязвимость классического фазового метода при прямом воздействии активных шумовых помех, когда система вынуждена работать в условиях экстремально низкого отношения сигнал/шум.

На третьем этапе был исследован совместный эффект угла прихода и отношения d/λ при фиксированном $SNR = 10$ дБ (Рис. 1в). Вблизи нормального направления ($\theta = 0^\circ$) увеличение пространственной базы приводит к существенному снижению $RMSE$. В

частности, для $d/\lambda = 0.25$ ошибка составляет около 8.2° , тогда как при $d/\lambda = 2.0$ она уменьшается приблизительно до 1° . Однако с увеличением угла прихода для широкобазовой системы происходит резкое ухудшение точности. Для $d/\lambda = 2.0$ уже при приближении к границе однозначного сектора около $\pm 14.5^\circ$ возникает фазовая неоднозначность, вследствие которой восстановленный угол может соответствовать ложной ветви пеленгационной характеристики. Это приводит к резкому скачкообразному увеличению $RMSE$ за пределами однозначного сектора.

Полученные результаты численного моделирования подтверждают теоретические положения, представленные в работе: увеличение отношения d/λ позволяет повысить угловую чувствительность и потенциальную точность фазового пеленгования, однако одновременно уменьшает диапазон однозначного определения направления.

Обобщенные результаты сравнительного теоретического анализа, объединяющие классические основы радионавигации и современные алгоритмические подходы, представлены в Таблице 1. Как видно из приведенных данных, ни один из методов в своем изолированном виде не способен одновременно обеспечить высокую пеленгационную чувствительность, устойчивость к дестабилизирующим факторам и однозначность измерений

Таблица 1 - Сравнительный анализ характеристик методов пеленгации источников радиоизлучения

Метод пеленгации	Пеленгационная чувствительность и точность	Диапазон однозначного измерения	Устойчивость к многолучевости и помехам	Аппаратная и вычислительная сложность	Ключевые особенности и применение
Амплитудный (метод максимума)	Низкая. Крутизна характеристики вблизи сглаженного максимума мала, что ведет к росту погрешности измерения.	Широкий (определяется шириной основного лепестка диаграммы направленности антенны).	Низкая. Сигналы сильно искажаются отражениями от рельефа и застройки, требуя корреляционно-интерферометрического восстановления.	Низкая. Не требует высокоточной фазовой синхронизации каналов.	Дает наибольшее отношение сигнал/шум в момент отсчета. Подходит для систем с невысокими требованиями к точности.
Амплитудный (метод минимума)	Высокая. Обеспечивается за счет измерения на участке с выраженным провалом и высокой крутизной.	Широкий.	Низкая. В условиях шумов "провал" замыывается, что снижает достоверность.	Ниже средней.	Позволяет точно определить угол, но из-за малой амплитуды сигнала затрудняет определение дальности. Применяется для мощных источников.
Амплитудный (сравнения / равносигнальный)	От высокой до очень высокой. Измерение выполняется на скачках диаграмм с максимальной крутизной.	Средний. Ограничен сектором пересечения двух диаграмм направленности.	Средняя. Многоканальное сравнение позволяет частично компенсировать влияние помех.	Средняя. В многоканальных системах необходима строгая идентичность характеристик приемных трактов.	Обеспечивает быстрое определение направления (без механического вращения). Широко применяется в системах автоматического сопровождения целей.

Фазовый (классический интерферометр)	Очень высокая. Возрастает прямо пропорционально увеличению отношения базы к длине волны (d/λ).	Узкий. Обратно пропорционален размеру антенной базы; при больших базах возникает двусмысленность (многозначность) пеленга.	Низкая. Фазовая интерференция переотраженных лучей вызывает критические сбои.	Высокая. Требуется наличие фазовых детекторов и жесткой временной и фазовой синхронизации каналов.	Потенциально наиболее точный метод из классических, но требует конструктивных решений для устранения неоднозначности (например, комбинации малых и больших баз).
Комбинированный (многобазовый фазовый + ЦОС)	Высокая (сверхразрешение). Как правило, использование алгоритмов подпространства (MUSIC, Beamscan) позволяет существенно повысить разрешающую способность по сравнению с классическими методами [9].	Широкий. Интеграция методов интерферометрии с алгоритмами подпространства и использование разноразмерных баз алгоритмически устраняют неоднозначность.	Высокая. Пространственно-временная обработка и адаптивные решетки позволяют выделять прямой сигнал и подавлять активные помехи [3].	Очень высокая. Требуется когерентного приема, высокоскоростных АЦП и значительных вычислительных ресурсов.	Считается одним из наиболее эффективных решений для современных систем пеленгации в условиях сложной электромагнитной обстановки и многолучевости [8].

Многоканальный способ пеленгации [8] позволяет повысить точность измерений и устранить их неоднозначность. Так, в двухканальной схеме за счет третьей антенны формируются две базы — малая и большая. Малая база используется для предварительной оценки направления и обеспечивает однозначность определения угла, тогда как увеличение длины базы позволяет получить более высокую разрешающую способность и выполнить уточненный отсчет угловой координаты. При этом современные комбинированные методы, интегрирующие корреляционные интерферометры на основе L1-нормы с алгоритмом MUSIC, позволяют эффективно разрешать фазовую неоднозначность даже при малом отношении сигнал/шум [13].

Кроме того, важным аспектом является оценка параметров когерентных и некогерентных источников в распределенных приемных системах (мультипеленгация), что требует применения модифицированных алгоритмов пространственного сглаживания [14]. В свою очередь, использование адаптивных антенных систем в таких комплексах позволяет формировать узкие диаграммы направленности, усиливать сигналы требуемого направления и пространственно подавлять излучения, поступающие с нежелательных направлений [15].

Для наглядного представления описанного комплексного подхода на рисунке 2 приведена обобщенная структурная схема разрабатываемой пеленгационной системы, все элементы которой представляют собой предлагаемую концептуальную архитектуру.

Место рассматриваемых классических методов и алгоритмов цифровой обработки в дальнейшей AI-архитектуре комплекса заключается в первичной подготовке признаков пространства. Вычисленные фазовые сдвиги и пространственные спектры (полученные, например, методом MUSIC) планируется использовать в качестве структурированных входных данных (обучающих выборок) для нейросетевых моделей, что обеспечит их робастность при классификации помех.

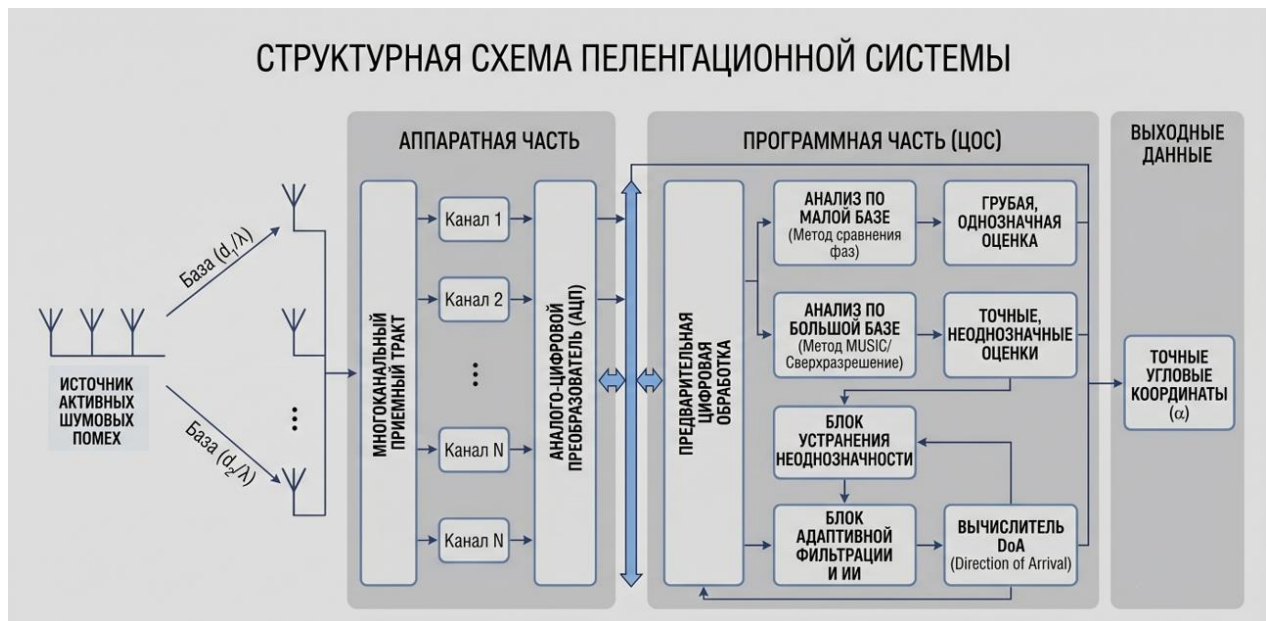


Рисунок 2 – Структурная схема пеленгационной системы

Устранить неоднозначность при определении направления на источник радиоизлучения можно с помощью антенн с узкими диаграммами направленности. При этом ширина α_a диаграммы должна соответствовать установленному условию: $\alpha_a < \Delta\alpha_{\max}$. Использование остронаправленных антенных систем не только позволяет обеспечить однозначность пеленгации, но и повышает угловое разрешение, благодаря чему становится возможным различение нескольких объектов, расположенных близко друг к другу по угловой координате.

Заключение.

В результате проведенного теоретического анализа амплитудных и фазовых методов пеленгации установлено, что применение классических подходов в изолированном виде зачастую оказывается недостаточным для обеспечения требуемой точности, однозначности и помехозащищенности в условиях сложной электромагнитной обстановки, многолучевого распространения и активного радиопротиводействия.

Проведенное численное моделирование методом Монте-Карло количественно подтвердило уязвимость классического фазового метода: показано, что при падении отношения сигнал/шум до отрицательных значений (что типично при воздействии активных шумовых помех) наблюдается резкий рост дисперсии фазовой ошибки и возрастает риск возникновения фазовой неоднозначности.

На основе систематизации технических ограничений сделан вывод, что одним из наиболее перспективных решений для современных систем является переход к комбинированным многоканальным архитектурам. Для существенного повышения точности пеленгации и минимизации влияния дестабилизирующих факторов выделены следующие целесообразные подходы:

- Внедрение алгоритмов пространственно-временной цифровой обработки (в частности, методов подпространства типа MUSIC) для программного нивелирования фазовой неоднозначности и пространственной фильтрации шумов.
- Интеграция данных от нескольких распределенных приемных станций (трилатерация и мультипеленгация), что играет определяющую роль в повышении достоверности пространственной локализации источника.

- Использование адаптивных антенных решеток, обеспечивающих динамическое управление диаграммой направленности для пространственного выделения полезного сигнала.

- Систематический учет аналитических моделей распространения радиоволн и регулярная аппаратная калибровка измерительных трактов для компенсации систематических погрешностей.

Таким образом, синтез многобазовых амплитудно-фазовых измерений с алгоритмами цифровой обработки сигналов формирует надежный базис для создания современных пеленгационных комплексов. Рассмотренные в работе математические модели и пространственные спектры выступают важным этапом предварительной обработки радиосигналов. В рамках развития предлагаемой концептуальной архитектуры комплекса эти извлеченные признаки послужат основой (структурированной обучающей выборкой) для внедрения алгоритмов искусственного интеллекта. Предлагаемый подход позволит существенно повысить эффективность обнаружения и точного определения угловых координат постановщиков активных шумовых помех даже в условиях интенсивного дестабилизирующего воздействия.

Список литературы

1. Алексеев, М.В. & Молоканов, А.А. (2019). Фазовый метод радиопеленгации. Форум молодых ученых, (12(40)), 23-26. <https://cyberleninka.ru/article/n/fazovyy-metod-radiopelengatsi>
2. Sabibolda, A., Tsyporenko, V., Tsyporenko, V., Smailov, N., Zhunussov, K., Abdykadyrov, A., Baigulbayeva, M. & Duisenov, N. (2022). Improving the accuracy and performance speed of the digital spectral-correlation method for measuring delay in radio signals and direction finding. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(9(115)), 6–14. DOI: [10.15587/1729-4061.2022.252561](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252561)
3. Singh, R. K., Higgins-Chen, M., Zhou, H., Falkner, B., & Mehta, A. (2023). MUSIC and Pattern Synthesis Based Anti-Jamming Software Application for Research & Education. In 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI) (pp. 1319-1320). IEEE. DOI: [10.1109/USNC-URSI52151.2023.10238045](https://doi.org/10.1109/USNC-URSI52151.2023.10238045)
4. Xu, J., Chen, B., Zhang, Z., Li, X., Hou, Y., & Li, Z. (2024, September). 2-D DOA Estimation Under Mainlobe Jamming Based on Subarray Level Blind Source Separation. In 2024 7th International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP) (pp. 613-618). IEEE. DOI: [10.1109/ICICSP62589.2024.10809034](https://doi.org/10.1109/ICICSP62589.2024.10809034)
5. Shen, L., Li, J., Pan, J., Shi, J., Xu, R., Wang, H., & Deng, W. (2025). Domain-adaptive direction of arrival (DOA) estimation in complex indoor environments based on convolutional autoencoder and transfer learning. Sensors, 25(10), 2959. DOI: [10.3390/s25102959](https://doi.org/10.3390/s25102959)
6. Ahmad B.I., Harman S., Godsill S.A. (2024). Bayesian track management scheme for improved multi-target tracking and classification in drone surveillance radar // IET Radar, Sonar & Navigation, 18(1), 137-146. DOI: [10.1049/rsn2.12458](https://doi.org/10.1049/rsn2.12458)
7. Zhao, H., Gong, J., & Zhou, C. (2026). A Deep Learning Approach for Direction-of-Arrival Estimation in Low-SNR Environments. Applied Sciences, 16(12), 5747. DOI: [10.3390/app16125747](https://doi.org/10.3390/app16125747)
8. Namie, H., Nagafuchi, D., & Fujita, T. (2025). Satellite signal arrival direction estimation to reduce multipath errors using general-purpose receivers and the Multiple Signal Classification (MUSIC) method in satellite positioning. IEICE Communications Express, 14(6), 257-259. DOI: [10.23919/comex.2025XBL0034](https://doi.org/10.23919/comex.2025XBL0034)
9. Cahl, D., Voulgaris, G. & Leonard, L. (2023). A comparison of beamforming and direction finding algorithms (beamscan and MUSIC) on a linear array HF radar in a medium to

low wave energy environment. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 40(2), 191-218. DOI: [10.1175/JTECH-D-22-0005.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-22-0005.1)

10. Zhou, L., Zhou, S., Qi, Y., Wu, L., & Benezeth, Y. (2025). A deep shrinkage network for direction-of-arrival estimation with sparse prior. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(2), 206. <https://doi.org/10.3390/jmse13020206>

11. Tian, Q., Cai, R., & Luo, Y. (2024). DOA estimation based on an adversarial learning network via small antenna arrays. *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 47(4), 226-232. DOI: 10.1109/ICJECE.2024.3472657

12. He, W., Shi, Y., Wang, J., & Zhao, H. (2026). A Low-SNR DOA Estimation Model Based on Sequential and Convolutional Feature Fusion. *Sensors*, 26(10), 3093. <https://doi.org/10.3390/s26103093>

13. Локтионов, Е.Ю., Протасов, Ю.С., Протасов, Ю.Ю., Телех, В.Д. & Хазиев, Р.Р. (2013). Разработка методики комбинированной интерферометрии светозероизонных потоков и комплексной автоматизированной обработки ее результатов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, (10(22)), 38. DOI: [10.18698/2308-6033-2013-10-1037](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-10-1037)

14. Aounallah, N., Bekhta, M. & Kina, A. (2024). Direction of arrival estimation methods for coherent and non-coherent sources. *Journal of Smart Antenna Systems*, 12(4), 112-128.

15. Дмитриев, Д.Д. & Карцан, И.Н. (2016). Адаптивные антенные решетки с цифровым формированием луча. *Решетневские чтения*, 1(20), 263-265. <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnye-antennye-reshetki-s-tsifrovym-formirovaniem-lucha>

References

1. Alekseev, M.V. & Molokanov, A.A. (2019). Fazovyi metod radiopelengatsii. *Forum molodykh uchenykh*, (12(40)), 23-26. <https://cyberleninka.ru/article/n/fazovyy-metod-radiopelengatsi>

2. Sabibolda, A., Tsyporenko, V., Tsyporenko, V., Smailov, N., Zhunussov, K., Abydykadyrov, A., Baigulbayeva, M. & Duisenov, N. (2022). Improving the accuracy and performance speed of the digital spectral-correlation method for measuring delay in radio signals and direction finding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(9(115)), 6-14. DOI: [10.15587/1729-4061.2022.252561](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252561)

3. Singh, R. K., Higgins-Chen, M., Zhou, H., Falkner, B., & Mehta, A. (2023). MUSIC and Pattern Synthesis Based Anti-Jamming Software Application for Research & Education. In 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI) (pp.1319-1320). IEEE. DOI: [10.1109/USNC-URSI52151.2023.10238045](https://doi.org/10.1109/USNC-URSI52151.2023.10238045)

4. Xu, J., Chen, B., Zhang, Z., Li, X., Hou, Y., & Li, Z. (2024, September). 2-D DOA Estimation Under Mainlobe Jamming Based on Subarray Level Blind Source Separation. In 2024 7th International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP) (pp. 613-618). IEEE. DOI: [10.1109/ICICSP62589.2024.10809034](https://doi.org/10.1109/ICICSP62589.2024.10809034)

5. Shen, L., Li, J., Pan, J., Shi, J., Xu, R., Wang, H., & Deng, W. (2025). Domain-adaptive direction of arrival (DOA) estimation in complex indoor environments based on convolutional autoencoder and transfer learning. *Sensors*, 25(10), 2959. DOI: [10.3390/s25102959](https://doi.org/10.3390/s25102959)

6. Ahmad B.I., Harman S., Godsill S.A. (2024). Bayesian track management scheme for improved multi-target tracking and classification in drone surveillance radar // *IET Radar, Sonar & Navigation*. 18(1), 137-146. DOI: [10.1049/rsn2.12458](https://doi.org/10.1049/rsn2.12458)

7. Zhao, H., Gong, J., & Zhou, C. (2026). A Deep Learning Approach for Direction-of-Arrival Estimation in Low-SNR Environments. *Applied Sciences*, 16(12), 5747. DOI: [10.3390/app16125747](https://doi.org/10.3390/app16125747)

8. Namie, H., Nagafuchi, D., & Fujita, T. (2025). Satellite signal arrival direction estimation to reduce multipath errors using general-purpose receivers and the Multiple Signal

Classification (MUSIC) method in satellite positioning. IEICE Communications Express, 14(6), 257-259. DOI: [10.23919/comex.2025XBL0034](https://doi.org/10.23919/comex.2025XBL0034)

9. Cahl, D., Voulgaris, G. & Leonard, L. (2023). A comparison of beamforming and direction finding algorithms (beamscan and MUSIC) on a linear array HF radar in a medium to low wave energy environment. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 40(2), 191-218. DOI: [10.1175/JTECH-D-22-0005.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-22-0005.1)

10. Zhou, L., Zhou, S., Qi, Y., Wu, L., & Benezeth, Y. (2025). A deep shrinkage network for direction-of-arrival estimation with sparse prior. Journal of Marine Science and Engineering, 13(2), 206. <https://doi.org/10.3390/jmse13020206>

11. Tian, Q., Cai, R., & Luo, Y. (2024). DOA estimation based on an adversarial learning network via small antenna arrays. IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 47(4), 226-232. DOI: [10.1109/ICJECE.2024.3472657](https://doi.org/10.1109/ICJECE.2024.3472657)

12. He, W., Shi, Y., Wang, J., & Zhao, H. (2026). A Low-SNR DOA Estimation Model Based on Sequential and Convolutional Feature Fusion. Sensors, 26(10), 3093. <https://doi.org/10.3390/s26103093>

13. Loktionov, E.Yu., Protasov, Yu.S., Protasov, Yu.Yu., Telekh, V.D. & Khaziev, R.R. (2013). Razrabotka metodiki kombinirovannoi interferometrii svetoerozionnykh potokov i kompleksnoi avtomatizirovannoi obrabotki ee rezul'tatov. Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii, (10(22)), 38. DOI: [10.18698/2308-6033-2013-10-1037](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-10-1037)

14. Aounallah, N., Bekhta, M. & Kina, A. (2024). Direction of arrival estimation methods for coherent and non-coherent sources. Journal of Smart Antenna Systems, 12(4), 112-128.

15. Dmitriev, D.D. & Kartsan, I.N. (2016). Adaptivnye antennye reshetki s tsifrovym formirovaniem luchy. Reshetnevskie chteniya, 1(20), 263-265. <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnye-antennye-reshetki-s-tsifrovym-formirovaniem-lucha>

БЕЛСЕНДІ ШУ КЕДЕРГІЛЕРІ КӨЗДЕРІН ПЕЛЕНГАЦИЯЛАУ ӘДІСТЕРІ

Аңдатпа. Жұмыста радио сәулелену көздерінен келетін немесе объектілерден шағылысу нәтижесінде пайда болатын радио толқындарының таралу бағытын белгілеу арқылы объектілердің бұрыштық жағдайын анықтау тәсілдері зерттеледі. Зерттеу "жасанды интеллект технологиясы негізінде ЛА радио сәулелену көздерін пассивті бағыттау міндеттері үшін аппараттық-бағдарламалық кешенді әзірлеу" ғылыми-техникалық жобасын гранттық қаржыландыру шеңберінде орындалады (03.10.2025 ж. №332/23-25 шарт, №Ар 327016/0225 жобасы). Зерттеулер жүргізу Қазақстан Республикасы Қарулы Күштері Қорғаныс Министрінің бірінші орынбасары - Қазақстан Республикасы Қарулы Күштері Бас штабы бастығының 2023 жылғы 18 қарашадағы № 62-3-4068 шешіміне сәйкес жүзеге асырылады. Көрсетілген бағыт шеңберінде әскери Радиотехника және электроника негіздері кафедрасында радио сәулелену көздеріне бағытты пассивті анықтаудың заманауи әдістерін кешенді зерделеу жүргізіледі. Қазіргі заманғы радиопеленгацияда радиосәулелену көздерінің, соның ішінде белсенді кедергілер қояушы құралдардың бұрыштық координаттарын дәл және жедел анықтау маңызды міндет болып қала береді. Бұл көп сәулелі таралудың күрделі жағдайларында өлшеу дәлдігі, байламның бір мәнділігі және жабдықтың кедергіге төзімділігі арасындағы ымыраны табуды талап етеді. Бұл жұмыста амплитудалық және фазалық пеленгациялау әдістерінің техникалық шектеулерін жүйелеу және оларды еңсеру жолдарын іздеу мақсатында салыстырмалы теориялық талдау жүргізіледі. Радиотехникалық жүйелерді математикалық талдау және мамандандырылған әдебиеттерді аналитикалық қорыту әдістерін қолдана отырып, аппаратура сезімталдығының антенналық жүйелердің геометриясына тәуелділігіне бағалау жүргізілді. Қосымша d/λ қатынасын, сигнал/шу қатынасын және сигналдың келу бұрышын өзгерте отырып, Монте-Карло әдісімен фазалық пеленгациялау әдісіне сандық модельдеу жүргізілді. Талдау көрсеткендей,

классикалық амплитудалық максимум әдісінің пеленгациялық сезімталдығы төмен. Фазалық әдістер, керісінше, жоғарырақ дәлдікті қамтамасыз етеді, алайда антенналар арасындағы қашықтық ұлғайған сайын олар пеленгтің көп мәнділігі (бір мәнді еместігі) мәселесімен бетпе-бет келеді. Жүргізілген жұмыстың нәтижесінде қажетті дәлдікке және өлшеулердің бір мәнділігіне қол жеткізу үшін аралас көп арналы тәсілдерді пайдалану неғұрлым орынды деген қорытынды жасалды. Сонымен қатар, сигналдарды цифрлық өңдеудің заманауи алгоритмдерін (мысалы, MUSIC алгоритмін) енгізу және бейімделгіш антенналық торларды қолдану көп сәулеліліктің тұрақсыздандырушы факторларының әсерін өтей алады.

Түйін сөздер: амплитудалық пеленгация, фазалық пеленгация, анықтау аймағы, белсенді кедергілерді қоюшы, сигнал, пеленг, шуга төзімділік.

METHODS FOR DIRECTION FINDING OF ACTIVE NOISE JAMMING SOURCES

Abstract. The paper examines approaches to determining the angular position of objects by establishing the direction of propagation of radio waves coming from radio emission sources or formed as a result of reflection from objects. The study is carried out within the framework of grant funding for the scientific and technical project “Development of a hardware and software complex for passive direction finding of radio emission sources of aircraft based on artificial intelligence technology” (contract No. 332/23-25 dated 03.10.2025, project No. AR 327016/0225). Research is also carried out in accordance with the decision of the First Deputy Minister of Defense of the Armed Forces of the Republic of Kazakhstan - Chief of the General Staff of the Armed Forces of the Republic of Kazakhstan dated November 18, 2023, No. 62-3-4068. Within the framework of this area, the Department of Fundamentals of Military Radio Engineering and Electronics conducts a comprehensive study of modern methods for passively determining the direction to radio emission sources. In modern radio direction finding, the accurate and rapid determination of the angular coordinates of radio emission sources, including active jammers, remains a critical task. This requires finding a compromise between measurement accuracy, unambiguous positioning, and equipment noise immunity under complex multipath propagation conditions. This paper conducts a comparative theoretical analysis of amplitude and phase direction-finding methods to systematize their technical limitations and identify ways to overcome them. Using methods of mathematical analysis of radio engineering systems and analytical synthesis of specialized literature, the dependence of equipment sensitivity on the geometry of antenna systems is evaluated. Additionally, numerical modeling of the phase direction-finding method was conducted using the Monte Carlo method by varying the d/λ ratio, signal-to-noise ratio, and signal arrival angle. The analysis shows that the classical amplitude maximum method has low direction-finding sensitivity. Phase methods, conversely, provide higher accuracy; however, as the distance between antennas increases, they encounter the problem of bearing ambiguity. As a result of the study, it is concluded that to achieve the required accuracy and unambiguous measurements, it is most expedient to use combined multichannel approaches. Furthermore, the implementation of modern digital signal processing algorithms (e.g., the MUSIC algorithm) and the use of adaptive antenna arrays can compensate for the impact of destabilizing multipath factors.

Keywords: amplitude direction finding, phase direction finding, detection zone, active jammer, signal, bearing, noise immunity.

Сведение об авторах

Аишев Аскар Ашимович	преподаватель кафедры основ военной радиотехники и электроники Военно-инженерного института радиоэлектроники и связи, подполковник E-mail: aisevaskar@gmail.com
Зикирьяев Нуржан Болатович	PhD, заместитель начальника кафедры основ военной радиотехники и электроники Военно-инженерного института радиоэлектроники и связи, подполковник E-mail: nurzhan.zikiryaev@bk.ru
Досжанов Ерлан Оспанович	PhD, ассоциированный профессор кафедры ЮНЕСКО по устойчивому развитию, Farabi University, E-mail: Yerlan.Doszhanov@kaznu.edu.kz
Нысанбаева Гульнура Рыскуловна	PhD, ассоциированный профессор кафедры «Общеобразовательные дисциплины», Академия Гражданской Авиации, E-mail: gulnur.83.29@mail.ru

Авторлар туралы мәлімет

Аишев Аскар Ашимович	Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты әскери радиотехника және электроника негіздері кафедрасының оқытушысы, подполковник, E-mail: aisevaskar@gmail.com
Зикирьяев Нуржан Болатович	PhD, Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты әскери радиотехника және электроника негіздері кафедрасы бастығының орынбасары, подполковник, E-mail: nurzhan.zikiryaev@bk.ru
Досжанов Ерлан Оспанович	PhD, Тұрақты даму бойынша ЮНЕСКО кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Farabi University, E-mail: Yerlan.Doszhanov@kaznu.edu.kz
Нысанбаева Гульнура Рыскуловна	PhD, «Жалпы білім беретін пәндері» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Азаматтық Авиация Академиясы E-mail: gulnur.83.29@mail.ru

Information about the authors

Aishev Askar	Lecturer at the Department of Fundamentals of Military Radio Engineering and Electronics, Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications, Lieutenant Colonel, E-mail: aisevaskar@gmail.com
Zikiryaev Nurzhan	PhD, Deputy Head of the Department of Fundamentals of Military Radio Engineering and Electronics, Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications, Lieutenant Colonel, E-mail: nurzhan.zikiryaev@bk.ru
Doszhanov Yerlan	PhD, Associate Professor of the UNESCO Chair on Sustainable Development, Farabi University, E-mail: Yerlan.Doszhanov@kaznu.edu.kz
Nyysanbayeva Gulnura	PhD, Associate Professor, Department of General Education Disciplines, Civil Aviation Academy, E-mail: gulnur.83.29@mail.ru



UDC 004.056:004.8

IRSTI 81.93.29

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_8

Ye.K. Makatov^{1*}, Bishwajeet Pandey², A.N. Ismukanova¹, E.S. Glock¹,
 G.K. Esmagambetova¹

¹Shokan Ualikhanov Kokshetau University; Kokshetau, Kazakhstan

² GL Bajaj Institute of Technology and Management, Greater Noida, India

*E-mail: yerkhanmakatov@gmail.com

RISK RANKING OF AUTHENTICATION EVENTS BASED ON TEMPORAL AND BEHAVIORAL CONTEXT

Abstract. Not all authentication log events require the same analysis priority; therefore, ranking them using temporal and behavioral context is relevant to information security. This study examines temporal and behavioral features for ranking authentication events by relative risk. The objective is to assess the contribution of behavioral representation to ranking quality and robustness, statistical validity, explainability, and calibration, and to test the technical feasibility of behavioral prioritization on real-world logs. Methods included baseline model comparison, representation ablation, chronological train/validation/test splitting, empirical random-ranking comparison, robustness and statistical analyses, explainability, calibration, low-and-slow temporal-horizon sensitivity, and behavioral feature-group ablation; NDCG@100 was the primary ranking metric. In the synthetic experiment, R2_behavioral_core achieved a higher mean NDCG@100 than R0_minimal (0.126952 vs. 0.071314) and outperformed it in 10 of 12 scenario-model combinations. Across 60 paired observations, mean Δ NDCG@100 was +0.046803 with a 95% confidence interval of [0.035444, 0.057751]. Empirical random-ranking analysis provided an additional reference for interpreting the absolute ranking scores: for Logistic Regression with R2_behavioral_core, NDCG@100 was 0.189052 versus a random mean of 0.010045 in the baseline scenario and 0.145514 versus 0.004943 in the rare-attacks scenario. The behavioral advantage remained condition-dependent and weakened under low-and-slow activity. Explainability and calibration were used to characterize score contributions, explanation stability, calibration quality, and ranking preservation.

For 1,760,511 real-world log events, prioritization scores and unique ranks were calculated from five past-only behavioral features, satisfying all 9/9 temporal/representation integrity requirements. Predictive effectiveness was not evaluated because verified security labels were unavailable. The synthetic results support the incremental ranking value of temporal and behavioral context, while the real-world analysis demonstrates the technical feasibility of implementing the corresponding past-only behavioral prioritization procedure. Confirming predictive effectiveness in operational settings requires temporal external validation using logs with verified security labels and semantic field documentation.

Keywords: authentication events, behavioral analysis, risk ranking, temporal validation, security event prioritization, machine learning, explainability.

Introduction.

In modern information systems, authentication logs are an important source of data describing access activities of users and system entities. Since security events differ in their

significance, ranking them by priority for further analysis, alongside their detection and classification, is an important task [1].

Rule-based methods, supervised machine learning, and anomaly detection approaches are used to analyze authentication logs [2]. However, rare security events, class imbalance, label noise, behavior that changes over time, and limited labeled data affect their results [3, 4]. Because individual event features do not fully capture the temporal and behavioral context of prior activity, features derived from historical activity are relevant [2]. Such features require validation that prevents temporal leakage, as the inclusion of future information in the model may lead to overestimated results [5].

When verified target labels are unavailable, supervised predictive evaluation may not be feasible, motivating the use of label-independent approaches to activity-log analysis [6]. Therefore, this study focuses on a multilevel evaluation of authentication event ranking based on behavioral context and on the technical applicability of its core methodological principles to incompletely labeled real-world logs.

The objective of the study is to evaluate the effects of temporal and behavioral features on relative-risk ranking of authentication events, as well as the robustness, statistical validity, explainability, and calibration properties of the results, and to determine the technical applicability of the ranking principles to real-world logs. To achieve this objective, baseline model comparison, representation ablation, robustness and statistical analyses, explainability and calibration assessments, and technical feasibility testing of the behavioral prioritization procedure on real-world data were performed.

The main hypothesis is that strictly past-only temporal and behavioral context provides incremental ranking information beyond a minimal event-level representation, while the magnitude of this contribution may vary across models, experimental scenarios, and temporal aggregation horizons. For real-world logs, an additional research question is whether the same temporal-integrity and behavioral-prioritization principles can be implemented reproducibly within a real-world log structure in the absence of verified target labels.

The scientific contribution of this study is a leakage-controlled, ranking-oriented evaluation framework for quantifying the incremental value of strictly past-only temporal and behavioral context in authentication-event prioritization. The framework integrates representation ablation, chronological temporal validation, empirical random-ranking comparison, robustness and statistical inference, low-and-slow temporal-horizon sensitivity, behavioral feature-group ablation, explainability, and calibration/ranking-preservation analysis.

Research on authentication security is expanding beyond the assessment of individual authentication events toward the analysis of behavioral profiles of users and system entities formed over time. In User and Entity Behavior Analytics, such profiles are constructed from previous actions and historical activity and used to detect deviations [2]. This highlights the importance of historical behavioral context as an additional source of information for evaluating authentication and security events.

Machine learning, anomaly detection, and contextual relationship modeling are used to analyze authentication events. In authentication alerts, accounting for relationships between events and contextual information may help reduce false-positive alerts [7]. Thus, security events should be considered not only individually but also within their contextual structure.

Although most studies focus on anomaly detection or classification, events identified during operational monitoring do not have equal significance. Security event prioritization therefore ranks events by analysis priority based on their characteristics and contextual information, transforming detection results into a prioritized list of security events or alerts [1].

Prioritizing events requires the evaluation of model outputs using ranking metrics. NDCG and precision-oriented measures can be applied to such tasks [8]. Accordingly, this study uses NDCG@100 as the primary endpoint and PR-AUC and Precision@100 as secondary metrics, while examining the sensitivity of NDCG@K at K = 25, 50, 100, 200.

Rare positive events, class imbalance, and label noise are important methodological issues in machine-learning-based security event analysis. Class imbalance may affect model results [3], while label noise may alter model performance and stability [4]. Sensitivity analysis across changes in positive-event prevalence and label noise therefore enables assessment of result robustness to changes in data composition.

Temporal context complements behavioral information by capturing the historical sequence of events and activity dynamics [2]. However, improper data splitting or preprocessing when using temporal features may cause data leakage and compromise the reliability of intrusion detection model evaluation. Leakage-free experimental procedures are therefore essential for reliable evaluation of cybersecurity models. Data leakage during preprocessing may lead to overestimated machine-learning performance and compromise the reliability of model evaluation [5]. In the synthetic experiment, target generation was therefore separated from the behavioral features subsequently used for model training to reduce direct deterministic circularity.

Temporal changes in cybersecurity data, class distributions, and label quality may affect model robustness and generalization [3, 4, 5, 9]. Accordingly, robustness can be evaluated across independent random seeds, temporal folds, positive-event prevalence, label-noise levels, and different K values. In addition, separate evaluation of low-and-slow scenarios, characterized by weak signals distributed over time, enables assessment of model robustness under complex behavioral patterns [10].

When comparing models, statistical validity should be assessed alongside mean performance metrics. Confidence intervals, statistical tests, and effect sizes make it possible to determine the extent to which differences observed across experimental conditions are independent of random variation. Statistical comparisons also require consideration of the independence of observations, because treating dependent results derived from the same data source as independent observations may introduce a risk of pseudo replication [11].

Explainability in security models helps identify which features influence model outputs and supports interpretation of decisions [12]. Permutation-based feature importance can be used to assess the influence of individual features [13], while comparing explanations across experimental conditions characterizes their stability. Feature contribution in this context does not represent a causal relationship; it describes a feature's contribution to the model output.

Calibration is used to assess and adjust the probabilistic properties of model outputs [14]. However, the ordering of original scores may be preserved differently depending on the calibration method. Therefore, calibration quality and preservation of the ranking structure should be evaluated separately in ranking tasks.

The reproducibility of machine-learning research is affected by randomness, training conditions, hyperparameters, software dependencies, and the documentation of experimental artifacts [15]. Recording random seeds, hyperparameters, the software environment, and experimental parameters is therefore essential for reproducing and verifying experimental procedures.

The use of real-world log data may be constrained by data availability, label quality, and the suitability of log fields for analysis. Although activity logs are used in security analysis, the structure and available attributes of real-world logs constrain the procedures that can be applied. Consequently, when approaches developed on synthetic or fully labeled data are applied to real-world logs, their compatibility with the available data structure and their technical feasibility should be assessed separately. When verified target labels are unavailable in real-world logs, supervised predictive evaluation may not be feasible, motivating the use of label-independent approaches to activity-log analysis [6]. In this study, a pre-specified neutral scoring rule was therefore used to rank events by relative analysis priority without interpreting the resulting score as an absolute risk level.

The literature shows that machine learning, behavioral and temporal context, anomaly detection, security event prioritization, and explainability are used in security log analysis, but

these aspects are often investigated separately. Therefore, it remains relevant to evaluate the additional contribution of behavioral representation to relative-risk ranking of authentication events within a unified experimental protocol covering temporal validation, robustness, statistical validity, and explainability, and to examine the technical applicability of these principles to incompletely labeled real-world logs.

Materials and research methods.

The study evaluates the ranking of authentication events by relative risk based on behavioral features using a synthetic dataset and assesses the technical applicability of the proposed approach to real-world log data. The study consists of a synthetic experiment and a technical feasibility assessment using real-world logs. The study comprises two interrelated parts. In the synthetic experiment, proxy labels are available, allowing model performance in relative-risk ranking to be evaluated using quantitative metrics. Because the real-world logs lack verified attack/benign labels and complete semantic documentation of event fields, this part is not treated as external validation of supervised attack detection or predictive performance; its purpose is to assess the technical feasibility of the behavioral prioritization procedure on real-world logs.

The synthetic experiment included baseline, rare attacks, low-and-slow, and noisy labels scenarios. Each scenario comprised 100,000 events over 30 days, with 2,500 users, 5,000 IP addresses, and 3,500 devices simulated. Normal activity was generated as a function of user, time, IP, and device context. Proxy-risk events were not defined using behavioral features calculated later: a latent scenario state was generated first, after which authentication result, IP, and device characteristics were modified probabilistically. This limited direct deterministic circularity between target generation and feature engineering.

Latent risk-event prevalence was 1% in the baseline scenario and 0.5% in the rare attacks scenario. In the low-and-slow scenario, prevalence remained at 1%, while the signal was weakened and proxy-risk events were distributed over time. In the noisy labels scenario, baseline generation was retained and asymmetric noise was introduced into the proxy labels. Pre-specified random seeds were used for the primary scenario generation, and five independent seeds were used for robustness analysis.

Three representations were compared: R0_minimal – hour and is_new_device; R1_temporal_volume – these features plus fails_ip_10m, fails_ip_1h, and fails_user_1h; and R2_behavioral_core – additionally including distinct_usernames_from_ip_1h. All historical behavioral features were calculated using past events only. The current event, other events with the same timestamp, and future events were excluded from historical aggregates; true_label and proxy_label were not used during feature construction. This design was intended to limit temporal and label leakage.

The data were chronologically split into train/validation/test sets at a 60%/20%/20% ratio. Model selection was based on NDCG@100 on the validation set, with PR-AUC used to break ties. The test set was not used to select models, representations, or hyperparameters and was reserved for final evaluation. Temporal stability was additionally assessed using four rolling temporal folds.

Logistic Regression, Random Forest, HistGradientBoosting, Isolation Forest, and a hybrid approach combining the Random Forest supervised score with the Isolation Forest anomaly score were evaluated. Hyperparameters were selected using validation data only and then frozen for subsequent representation ablation, robustness, and statistical analyses. Preprocessing operations requiring learning from the data were fitted only on the training set and applied unchanged to the validation and test sets. Class imbalance was addressed through class weighting in Logistic Regression and Random Forest.

NDCG@100 was used as the primary endpoint, with PR-AUC and Precision@100 as secondary metrics. Ranking robustness was evaluated across five independent random seeds, temporal folds, prevalence changes, and label-noise changes, while sensitivity to K was assessed at K = 25, 50, 100, and 200. To provide a chance-level reference for the absolute ranking scores,

an empirical random-ranking baseline was additionally evaluated by repeatedly randomizing event ordering while preserving the scenario-specific label composition. Observed NDCG@K values were compared with the corresponding random distributions using the random mean, absolute difference, relative lift, and empirical exceedance probability. The low-and-slow scenario was further examined as a separate robustness condition characterized by weak signals distributed over time.

Because the original low-and-slow experiment showed a reduced behavioral advantage, a dedicated temporal-horizon sensitivity analysis was conducted. The canonical historical horizon was compared with $\times 2$, $\times 4$, and $\times 8$ extensions using the frozen Logistic Regression, Random Forest, and HistGradientBoosting configurations across four rolling temporal folds. The purpose was to determine whether ranking performance under temporally distributed weak signals depended on the amount of historical context rather than to select an optimal horizon post hoc. A subsequent behavioral feature-group ablation used the canonical reference horizon to examine the conditional contribution of user failure history, source-IP failure history, calendar-time context, device novelty, and source-IP username diversity. Feature groups were defined from the pre-existing feature implementation and representation specification rather than from validation outcomes.

Explainability analysis was conducted using the pre-specified focal configuration of Logistic Regression with `R2_behavioral_core`. Global coefficients, permutation importance, and event-level feature contributions were calculated, while local additivity, Top-100 explanations, and explanation stability were evaluated across independent seeds and temporal splits. Explanations were interpreted as feature contributions to the ranking score rather than causal effects.

Calibration analysis included raw probability, sigmoid calibration, and isotonic calibration. Calibration followed the original temporal train/validation/test split. The base model was trained only on the training data, while the validation set previously used for model selection served as the calibration split, and the calibrator was fitted on these data. Test data were not used to fit the calibrator. Calibration was evaluated using the Brier score, log loss, ECE-10, and calibration slope/intercept; preservation of the ranking structure was assessed using Spearman correlation, Kendall correlation, Top-100 overlap, and NDCG@100.

Before robustness, statistical, explainability, and calibration analyses, the experimental protocol was fixed, specifying NDCG@100 as the primary endpoint, Logistic Regression as the focal model, and `R2_behavioral_core` as the focal representation. Test results were not used to select this configuration. Random seeds, frozen hyperparameters, protocol parameters, software environment metadata, and key artifact hashes were recorded for reproducibility.

The real-world data consisted of anonymized logs obtained from the `platonus.kgu.kz` platform of Shokan Ualikhanov Kokshetau University. The data were provided under Agreement No. 282 dated July 31, 2025, and processed in accordance with information security and privacy requirements.

The logs first underwent structural and semantic auditing, including checks of file integrity, record structure, timestamp validity, event identifier uniqueness, duplicates, temporal ordering, candidate entity identifier stability, and the availability of source-level fields. Because complete semantic documentation was unavailable, unverified authentication success/failure states, attack/benign labels, or risk classes were not assigned to the records.

The feasibility of calculating the `R2_behavioral_core` features used in the synthetic experiment from the available real-world log fields was first assessed. Because no direct correspondence was available, repeated values of the `subjectHost` field were technically used to characterize candidate source-level activity, although the exact semantics of this field were not verified.

The real-world representation consisted of five past-only behavioral features: `source_events_10m` – the number of events recorded for the same source during the 10 minutes preceding the current event; `source_events_1h` – the number of events for the same source during

the preceding hour; `candidate_entity_events_1h` – the number of events for the same candidate entity during the preceding hour; `distinct_candidate_entities_source_1h` – the number of unique candidate entities observed through the same source during the preceding hour; and `source_changed_from_previous_event` – a binary feature indicating whether the candidate entity's current source differed from its source in the most recent preceding event. The candidate entity was not interpreted as a verified user identifier.

When calculating historical features for each event i , only preceding events satisfying $t_j < t_i$ were used. The current event, other events with the same timestamp, and future events were excluded from historical aggregates. The first four numerical behavioral features were transformed to the $[0,1]$ interval using strictly-past midrank percentiles based on the empirical distribution of historical values available before each event. The `source_changed_from_previous_event` feature was used as a binary 0/1 component.

Because no verified target was available, neither a supervised model nor feature weights were learned from the real-world data. The five behavioral components were assigned equal pre-specified weights of 0.2, and the relative prioritization score for each event i was calculated as

$$S_i = 0.2(P_{10m,i} + P_{1h,i} + P_{entity,i} + P_{distinct,i} + C_i)$$

where $P_{10m,i}$, $P_{1h,i}$, $P_{entity,i}$ and $P_{distinct,i}$ – are the strictly-past empirical percentile values of the corresponding behavioral features, and C_i is the binary `source_changed_from_previous_event` component. Equal weighting was treated as a pre-specified neutral scoring rule to avoid learning unsupported predictive weights from data without verified labels. The prioritization score does not represent attack probability, calibrated probability, a malicious/benign class, or an absolute risk level; it is used to rank events by relative priority based on observed behavioral activity.

Events were ranked deterministically by prioritization score. The technical correctness of the ranking procedure was verified through score–rank consistency, rank uniqueness, missing and duplicate ranks, and score–order violations. Temporal and representation integrity were further controlled using nine contract checks: consistency with the stored representation hash, independent hash recomputation, consistency of feature names and order, enforcement of the strictly past-only principle, exclusion of same-timestamp events from history, prevention of missing candidate entity values from being merged into a single artificial entity, prevention of missing source values from being merged into a single artificial source, a cold-start zero policy for count-based historical features, and a cold-start NULL policy for the previous-event feature. Compliance with these requirements was verified through leakage and representation integrity audits.

Feature-level contribution analysis was performed for the Top-10, Top-100, Top-1000 events. Contribution values were used to characterize the event-level contribution of the five components forming the prioritization score and were not interpreted as causal attribution or evidence of the cause of risk.

Compatibility between the synthetic and real-world data was evaluated not through feature-by-feature correspondence but through adherence to shared methodological principles: preservation of temporal ordering, construction of past-only behavioral context, use of entity/source-level information, calculation of a relative score, deterministic ranking, and feature-level explanation. Accordingly, the real-world component is not a predictive external validation of the synthetic experiment but an assessment of the technical feasibility of the proposed behavioral prioritization procedure within a real-world log structure. The software code used in this study is publicly available in a GitHub repository the link is provided below.

Results and their discussion.

The experiment began with processing the synthetic dataset using the methods described in the Materials and Methods section. In the baseline scenario, no additional distortion was introduced into the data, and the initial performance of machine-learning models in ranking

authentication events by behavioral risk was evaluated. NDCG@100 was used as the primary metric, with PR-AUC and Precision@100 as secondary evaluation metrics.

Table 1 – Ranking performance of models in the baseline scenario on the synthetic dataset

Model	PR-AUC	Precision@100	NDCG@100
Logistic Regression	0.0867	0.2100	0.1891
HistGradientBoosting	0.0793	0.1800	0.1704
Hybrid	0.0811	0.1700	0.1607
Random Forest	0.0795	0.1100	0.1496
Isolation Forest	0.0210	0.0100	0.0075
<i>Note – compiled by the authors.</i>			

The baseline experiment on the synthetic dataset showed differences among the models in their ability to place proxy-risk events at higher ranking positions. Logistic Regression achieved the highest value for the primary ranking metric, whereas Isolation Forest performed below the supervised learning models. These results characterize the initial relative performance of the models under baseline conditions and do not imply the superiority of any single model across all scenarios.

To evaluate the effect of the feature set on ranking quality, three representations were compared: R0_minimal, representing minimal context; R1_temporal_volume, containing temporal and activity-volume features; and R2_behavioral_core, containing the core behavioral features. Representation ablation was conducted across four scenarios using three supervised models: Logistic Regression, Random Forest, and HistGradientBoosting. Isolation Forest, as an unsupervised anomaly-detection method, and Hybrid, as a composite scoring approach, were excluded from the representation ablation and evaluated within the baseline model comparison. NDCG@100 was used as the primary evaluation metric.

Table 2 – Effect of the feature set on ranking quality in the synthetic dataset

Feature set	Description	Mean NDCG@100
R0_minimal	Minimal feature set	0.071314
R1_temporal_volume	Temporal and activity-volume features	0.087488
R2_behavioral_core	Core behavioral features	0.126952
<i>Note – compiled by the authors.</i>		

The ranking benefit of behavioral context was not uniform across experimental conditions. To interpret the absolute NDCG values appropriately, the observed scores were additionally compared with an empirical random-ranking reference rather than treated as classification accuracy. For Logistic Regression with R2_behavioral_core, NDCG@100 was 0.189052 versus a random mean of 0.010045 in the baseline scenario, 0.145514 versus 0.004943 in the rare-attacks scenario, and 0.194898 versus 0.010336 under noisy labels. These results indicate that the principal synthetic rankings were substantially above chance-level ordering, while the magnitude of the behavioral advantage remained dependent on the experimental condition.

The robustness of the results across different experimental conditions was then examined. To avoid relying on a single data split or random initialization, the analysis covered multiple independent seeds, temporal splits, different prevalence levels of proxy-risk events, and label-noise conditions. Sensitivity to the selected K value and robustness under the low-and-slow scenario were also evaluated.

Table 3 – Quantitative assessment of robustness and sensitivity on the synthetic dataset

Evaluation dimension	Experimental scope	Main quantitative result
Seed robustness	5 seeds $\times$ 4 scenarios	Mean NDCG@100: 0.0686–0.1500; SD: 0.0275–0.0527
Temporal robustness	16 folds (4 $\times$ 4 scenarios)	Mean NDCG@100: 0.0591–0.1400; SD: 0.0235–0.0576
Sensitivity to proxy-risk event prevalence	5 prevalence levels	Mean NDCG@100: 0.1088–0.2104
Sensitivity to label noise	5 noise levels	Mean NDCG@100: 0.1041–0.1500
Sensitivity to K	K = 25, 50, 100, 200	Mean NDCG@K: 0.0609–0.1846
Paired R0–R2 comparison	60 paired observations	Mean Δ NDCG@100 = +0.0468; 95% CI [0.0354, 0.0578]
Low-and-slow robustness	3 models $\times$ 5 seeds	LR: R0 0.0633 $\rightarrow$ R2 0.0686; Δ = +0.0053; R2 win rate = 80%
<i>Note – compiled by the authors.</i>		

The robustness and sensitivity analyses showed that the contribution of behavioral representation varied across experimental conditions and was not uniform across scenarios. The low-and-slow condition was the clearest limitation, indicating that weak signals distributed over time are more difficult to rank using the reference temporal context. This observation motivated a dedicated temporal-horizon analysis to determine whether the limitation was related to the amount of historical information available to the model.

A statistical analysis was performed to compare the R2 behavioral feature set with the R0 minimal feature set. Sixty paired observations were used to determine whether the previously observed improvement in ranking quality could be attributed to random variation. The analysis included the NDCG@100 difference, a bootstrap confidence interval, the Wilcoxon test, a paired permutation test, and effect-size estimation.

Table 4 – Statistical comparison of the R2 and R0 feature sets on the synthetic dataset

Statistical measure	Result
Number of paired observations	60
Mean Δ NDCG@100 (R2 – R0)	+0.046803
95% bootstrap confidence interval	[0.035444, 0.057751]
Wilcoxon p-value	1.785×10^{-8}
Paired permutation test p-value	$\approx 1.0 \times 10^{-5}$
Rank-biserial effect size	0.8361
Pseudoreplication detected	No
<i>Note – compiled by the authors.</i>	

The mean increase in NDCG@100 for R2 relative to R0 was positive, and the 95% confidence interval did not include zero. The Wilcoxon and permutation tests also supported the statistical significance of the difference between the two feature sets. The rank-biserial measure indicated a large effect size.

The explainability of the model's ranking results and the calibration properties of its outputs were also evaluated. Explainability analysis focused on identifying the contribution of individual features to the risk-ranking score generated by the model. Explanation stability was additionally assessed across different seeds and temporal splits.

Table 5 – Evaluation of model explainability and calibration on the synthetic dataset

Evaluation dimension	Measure	Result
Global explainability	Logistic Regression coefficients	Baseline largest absolute coefficients: <code>distinct_usernames_from_ip_1h</code> = 0.8414; <code>is_new_device</code> = 0.6301
Feature importance	Permutation importance	Baseline largest Δ NDCG@100: <code>is_new_device</code> = 0.1597; <code>distinct_usernames_from_ip_1h</code> = 0.1204
Local explainability	Local additivity	Absolute error between model score and reconstructed score: $0-4.44 \times 10^{-16}$
Top-100 explanations	Feature-level contributions	Baseline Top-100: <code>is_new_device</code> dominant in 97/100 events (97%); fails <code>user_1h</code> in 3/100 (3%)
Seed explanation stability	5 independent seeds	Mean Spearman ρ : baseline 1.0000; rare attacks 0.9657; noisy labels 0.8914; low-and-slow 0.7257
Temporal explanation stability	4 temporal folds; 24 scenario $\times$ feature combinations	Sign consistency = 1.00 in 22/24 (91.67%); 0.75 in 2/24 (8.33%)
Low-and-slow explainability	Top-100 feature contributions	<code>is_new_device</code> : mean absolute contribution 0.9672, dominant in 62/100 (62%); fails <code>user_1h</code> : 0.8883, dominant in 38/100 (38%)
Calibration data split	Temporal train $\rightarrow$ calibration $\rightarrow$ test	Temporal ordering preserved; test events were not used for calibration fitting
Raw probability	RAW, baseline	Brier = 0.141207; Log loss = 0.450438; ECE-10 = 0.317984
Sigmoid calibration	Baseline	Brier = 0.009779; Log loss = 0.048392; ECE-10 = 0.000738
Isotonic calibration	Baseline	Brier = 0.009761; Log loss = 0.048250; ECE-10 = 0.000559
Calibration slope/intercept	Baseline	Sigmoid: slope 1.070599, intercept 0.308024; Isotonic: slope 0.998574, intercept 0.029386
Ranking preservation after sigmoid	Spearman, Kendall, Top-100, NDCG@100	ρ = 1.000; τ = 1.000; Top-100 overlap = 1.00; NDCG@100: 0.189052 $\rightarrow$ 0.189052
Ranking change after isotonic	Spearman, Kendall, Top-100, NDCG@100	ρ = 0.9440; τ = 0.8505; Top-100 overlap = 0.39; NDCG@100: 0.189052 $\rightarrow$ 0.141684
<i>Note – compiled by the authors.</i>		

The analysis showed that the features contributing to the model's ranking score could be characterized at both global and individual-event levels. Evaluating explanations across seeds and temporal splits made it possible to assess whether they depended on a single experimental run. Separate analysis of the low-and-slow scenario characterized explanation stability and the structure of feature contributions under temporally distributed activity.

Calibration analysis was conducted while preserving the temporal split, and test data were not used for calibration fitting. These results characterize the calibration properties of the model output under the synthetic experimental conditions.

The real-world dataset consisted of four source files containing a total of 1,760,511 events. All eventTime values were parsed successfully. The dataset contained 735,172 unique timestamps. A total of 1,427,741 events (81.098%) shared their timestamp with at least one other event, and

the largest same-timestamp group contained 197 events. No duplicate eventID values were detected; therefore, events were sorted deterministically by eventTime and eventID.

The dataset contained 8,668 candidate entity identifiers recurring over time. Of these, 8,660 (99.908%) occurred in multiple events, 8,399 (96.897%) occurred on multiple days, and 8,121 (93.689%) occurred across multiple source files. The median number of events per identifier was 81, the median number of active days was 19 days, and the median observation span was 63.853 days. The subjectHost field contained 1,458,615 non-empty IPv4-formatted values, while eventTypeID contained 34 distinct codes.

No documentation describing the semantics of the event fields was provided with the source data. Consequently, it was not possible to verify whether the candidate entity identifier represented an actual user or account identifier, to establish the exact semantics of subjectHost, or to determine the meanings of the 34 eventTypeID codes. No reliable session or device identifier was identified.

Because verified target labels were unavailable, predictive temporal validation and label-dependent metrics such as NDCG@100, PR-AUC, and Precision@K were not calculated for the real-world data.

The eventTime field could be used to establish temporal ordering, eventID to uniquely identify each event, the candidate entity identifier to link the historical activity of the same object, and repeated subjectHost values to technically characterize candidate source-level activity. The consistent recurrence of identifiers across multiple events and days provided sufficient history for calculating temporal behavioral patterns. These properties formed the basis for evaluating the technical feasibility of the behavioral prioritization procedure on the real-world logs.

Compatibility between the synthetic experiment and the real-world data was determined to be partial. The original R2_behavioral_core feature set used in the synthetic dataset could not be transferred unchanged to the real-world logs. Therefore, a separate real-native behavioral representation was constructed according to the available fields and semantic limitations of the real-world data.

Table 6 – Technical feasibility results of the behavioral prioritization procedure on real-world log data

Evaluated measure	Result
Real-world events processed	1,760,511
Real-native behavioral features	5
Temporal/representation integrity contracts	9/9
Events with calculated scores	1,760,511/1,760,511
Score range	0.12439–0.99326
Mean score	0.48346
SD	0.15362
Median	0.50000
P95	0.74795
P99	0.79126
Unique ranks	1,760,511/1,760,511
Missing / duplicate ranks	0/0
Score-order violations	0
Verified attack/benign labels	0
<i>Note – compiled by the authors.</i>	

Feature-level explainability was also evaluated for the highest-ranked events. Feature contributions were calculated for the Top-10, Top-100, Top-1000 events.

Table 7 – Feature-level contribution results for the highest-ranked events in the real-world log data

Selection	source changed from previous event	distinct candidate entities source 1h
Top-10	10/10 (100%)	0/10 (0%)
Top-100	99/100 (99%)	1/100 (1%)
Top-1000	995/1000 (99.5%)	5/1000 (0.5%)
<i>Note – compiled by the authors.</i>		

This measure is a relative prioritization score calculated from observed behavioral activity features to prioritize events for further security analysis. It does not represent attack probability, a malicious/benign class, or a diagnostic risk level.

The results demonstrated the additional informational value of temporal and behavioral context for ranking authentication events by relative risk. The R2_behavioral_core configuration outperformed R0_minimal in 10 of 12 scenario–model combinations. Across 60 paired observations, the mean $\Delta\text{NDCG}@100$ was +0.0468, with a 95% confidence interval of [0.0354, 0.0578] that did not include zero. The Wilcoxon and paired permutation tests supported the statistical significance of the difference, while the rank-biserial correlation indicated a large effect size. These findings support the main hypothesis at the overall experimental level; however, because R2 did not outperform R0 under every condition, its advantage cannot be considered universal.

The findings are consistent with studies showing that historical activity and behavioral context provide additional information for characterizing the activity profiles of users or system entities and assessing deviations from them [2]. Prioritizing security events according to contextual characteristics is also considered a practical approach to identifying events requiring further analysis [1]. The methodological contribution of this study is the controlled evaluation of the incremental ranking value of strictly past-only behavioral context within an integrated protocol covering representation ablation, temporal leakage control, chronological validation, empirical chance-level comparison, robustness, statistical inference, low-and-slow temporal-horizon sensitivity, feature-group ablation, explanation stability, and calibration/ranking preservation.

The robustness analysis assessed stability across random seeds, temporal folds, positive-event prevalence, label noise, and K values, consistent with previous studies on the effects of data composition and temporal variation on model performance [3, 4, 9]. Because the original low-and-slow configuration showed only a small R2 advantage for Logistic Regression, temporal-horizon sensitivity was examined separately. Mean $\text{NDCG}@100$ for Logistic Regression increased from 0.059091 at the reference horizon to 0.090420, 0.108764, and 0.086422 at the $\times 2$, $\times 4$, and $\times 8$ horizons, respectively. For Random Forest, the corresponding values increased from 0.052101 to 0.075489, 0.079994, and 0.065853. HistGradientBoosting showed a non-monotonic response: $\text{NDCG}@100$ decreased at the $\times 2$ and $\times 4$ horizons but increased from 0.079763 to 0.097131 at $\times 8$. Thus, extending historical context improved low-and-slow ranking for some model–horizon combinations but did not provide a universal solution. Because the analysis was based on four rolling temporal folds, these results are interpreted as sensitivity evidence rather than definitive inferential proof. Behavioral feature-group ablation further indicated a model-dependent contribution structure, with no single feature group universally accounting for low-and-slow ranking performance. Explainability analysis characterized the features contributing to the ranking score at both global and event levels and assessed their stability across seeds and temporal splits, consistent with studies emphasizing the importance of explainability in cybersecurity models [12]. Feature contributions were not interpreted as causal effects. Explanation stability decreased in the low-and-slow scenario. In the calibration analysis, sigmoid calibration fully preserved the ranking structure, whereas isotonic calibration, despite improving calibration metrics, reduced Top-100 overlap to 0.39 and changed $\text{NDCG}@100$ from 0.189052 to 0.141684. These results show that improved calibration does not necessarily imply preservation of the original ranking structure.

Therefore, calibration quality [14] and ranking preservation were evaluated as distinct properties in this study.

In the real-world logs, prioritization scores and unique ranks were calculated for all events using five real-native past-only behavioral features. All 9/9 temporal/representation integrity contracts were satisfied, and no score-order violations were detected. These results establish the technical feasibility, temporal integrity, and reproducibility of the behavioral prioritization procedure within the available real-world log structure. They do not establish attack-detection accuracy, predictive ranking validity, or the maliciousness of highly ranked events because verified attack/benign ground truth was unavailable. The connection between the synthetic and real-world components was based not on feature-by-feature correspondence but on shared methodological principles: temporal ordering, past-only behavioral context, entity/source-level information, relative scoring, deterministic ranking, and feature-level explanation. Because verified labels were unavailable, predictive optimal weights were not learned for real-world scoring; instead, the five components were assigned equal pre-specified weights of 0.2. The main limitations are that predictive ranking performance was evaluated using synthetic data and proxy-risk labels, verified target labels were unavailable in the real-world logs, the semantics of the candidate entity and source fields were not fully verified, and the predictive optimality of the real-world scoring components was not assessed. Therefore, synthetic performance cannot be directly generalized to an operational environment. Future research should conduct temporal predictive external validation using real-world authentication logs with semantic field documentation and verified security labels.

Conclusion.

The study showed that strictly past-only temporal and behavioral context provides measurable incremental information for ranking authentication events under the labeled synthetic experimental conditions. R2_behavioral_core generally improved ranking relative to the minimal representation, and empirical random-ranking analysis provided a chance-level reference showing that the principal observed rankings were substantially above random ordering. The effect was nevertheless condition-dependent: dedicated low-and-slow analysis showed sensitivity to both model choice and temporal horizon, while feature-group ablation indicated a model-dependent contribution structure. The scientific contribution is a leakage-controlled and ranking-oriented evaluation of behavioral context that combines representation ablation, chronological temporal validation, empirical random-ranking comparison, robustness and statistical inference, low-and-slow temporal-horizon sensitivity, feature-group ablation, explainability, and calibration/ranking preservation. This framework characterizes not only whether behavioral context improves ranking, but also the experimental conditions under which its contribution strengthens, weakens, or becomes model-dependent.

Because verified security labels were unavailable in the real-world logs, predictive effectiveness was not evaluated. However, the technical feasibility of the core behavioral prioritization procedures was demonstrated. Generalizing the findings to predictive performance in operational environments requires subsequent external validation on authentication logs containing verified labels and semantic documentation of event fields.

Acknowledgments. *The authors express their sincere gratitude to the Department of Information and Communication Technologies of Sh. Ualikhanov Kokshetau University for the scientific and methodological support provided during the course of this research.*

The software code used in this study is publicly available in the GitHub repository: <https://github.com/ItBilim/behavioral-risk-ranking>.

References

1. Liu, J., Zhang, R., Liu, W., Xue, J., & Wang, H. (2022). Context2Vector: Accelerating security event triage via context representation learning. *Information and Software Technology*, 146, 106856. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.106856>
2. Martin, A. G., Fernandez-Isabel, A., Martin de Diego, I., & Beltran, M. (2021b). A survey for user behavior analysis based on machine learning techniques: Current models and applications. *Applied Intelligence*, 51(8). <https://doi.org/10.1007/s10489-020-02160-x>
3. Ndichu, S., Ban, T., Takahashi, T., & Inoue, D. (2023). AI-assisted security alert data analysis with imbalanced learning methods. *Applied Sciences*, 13(3), 1977. <https://doi.org/10.3390/app13031977>
4. Yasuda, G., Suko, T., Kobayashi, M., & Matsushima, T. (2023). Asymptotic evaluation of classification in the presence of label noise. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, E106.A(3). <https://doi.org/10.1587/transfun.2022TAP0013>
5. Bouke, M. A., & Abdullah, A. (2023). An empirical study of pattern leakage impact during data preprocessing on machine learning-based intrusion detection models reliability. *Expert Systems with Applications*, 230, 120715. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120715>
6. Ianni, M., & Masciari, E. (2023). SCOUT: Security by computing OUTliers on activity logs. *Computers & Security*, 132, 103355. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103355>
7. Wang, Y., Hallgren, K., & Larson, J. (2024). A graph-based framework for reducing false positives in authentication alerts in security systems. In *Companion Proceedings of the ACM Web Conference 2024*. <https://doi.org/10.1145/3589335.3648325>
8. Adàlia, R., Sanjuan, G., Margalef, T., & Zamora, I. (2025). The LambdaGap framework for precision-oriented ranking. *ACM Transactions on Information Systems*, 43(4), Article 97, 1–39. <https://doi.org/10.1145/3733235>
9. Rabbi, K. F., Lou, H. H., & Liu, X. (2026). The impact of time-aware design choices in ICS anomaly detection. In *2026 IEEE 16th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. <https://doi.org/10.1109/CCWC67433.2026.11393705>
10. Rios, V., et al. (2024). Enhanced detection of low-rate DDoS attack patterns using machine learning models. *Journal of Network and Computer Applications*, 227, 103903. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2024.103903>
11. Berrar, D., & Lozano, J. A. (2013). Significance tests or confidence intervals: Which are preferable for the comparison of classifiers? *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 25(2), 189–206. <https://doi.org/10.1080/0952813X.2012.680252>
12. Sharma, B., Sharma, L., Lal, C., & Roy, S. (2024). Explainable artificial intelligence for intrusion detection in IoT networks: A deep learning based approach. *Expert Systems with Applications*, 238, 121751. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121751>
13. Altmann, A., Tološi, L., Sander, O., & Lengauer, T. (2010). Permutation importance: A corrected feature importance measure. *Bioinformatics*, 26(10), 1340–1347. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq134>
14. Silva Filho, T., Song, H., Perello-Nieto, M., Santos-Rodriguez, R., Kull, M., & Flach, P. (2023). Classifier calibration: A survey on how to assess and improve predicted class probabilities. *Machine Learning*, 112, 3211–3260. <https://doi.org/10.1007/s10994-023-06336-7>
15. Semmelrock, H., Ross-Hellauer, T., Kopeinik, S., Theiler, D., Haberl, A., Thalmann, S., & Kowald, D. (2025). Reproducibility in machine-learning-based research: Overview, barriers, and drivers. *AI Magazine*, 46, e70002. <https://doi.org/10.1002/aaai.70002>

АУТЕНТИФИКАЦИЯ ОҚИҒАЛАРЫН УАҚЫТТЫҚ ЖӘНЕ МІНЕЗ-ҚҰЛЫҚТЫҚ КОНТЕКСТ НЕГІЗІНДЕ ТӘУЕКЕЛ БОЙЫНША РАНЖИРЛЕУ

Аңдатпа. Аутентификация журналдарындағы оқиғалар талдау басымдығы бойынша бірдей емес, сондықтан оларды уақыттық және мінез-құлықтық контекст негізінде ранжирлеу ақпараттық қауіпсіздіктегі маңызды міндет болып табылады. Зерттеудің мақсаты — мінез-құлықтық ұсынудың аутентификация оқиғаларын салыстырмалы тәуекел бойынша ранжирлеу сапасына қосатын үлесін, нәтижелердің тұрақтылығын, статистикалық негізділігін, түсіндірмелілігін және калибрленуін бағалау, сондай-ақ мінез-құлықтық басымдықтау тәсілінің нақты журналдық деректерде техникалық орындалуын тексеру. Зерттеуде бастапқы модельдерді салыстыру, ұсыну нұсқаларын абляциялық талдау, деректерді хронологиялық түрде оқыту, валидация және тестілеу жиындарына бөлу, эмпирикалық кездейсоқ ранжирлеумен салыстыру, тұрақтылық пен статистикалық талдау, түсіндірмелілік пен калибрлеуді бағалау, баяу және біртіндеп жүретін белсенділік жағдайындағы уақыттық горизонтқа сезімталдықты тексеру және мінез-құлықтық белгілер топтарының абляциялық талдауы қолданылды. Негізгі ранжирлеу метрикасы ретінде NDCG@100 пайдаланылды. Синтетикалық экспериментте R2_behavioral_core ұсынуы орташа NDCG@100 көрсеткіші бойынша R0_minimal ұсынуынан жоғары нәтиже көрсетті: тиісінше 0.126952 және 0.071314. R2_behavioral_core 12 сценарий-модель комбинациясының 10-ында R0_minimal-дан басым болды. 60 жұптық бақылау бойынша орташа Δ NDCG@100 +0.046803 құрады, ал 95% сенімділік интервалы [0.035444, 0.057751] болды. Эмпирикалық кездейсоқ ранжирлеу абсолюттік NDCG@100 мәндерін түсіндіру үшін қосымша салыстыру деңгейін қамтамасыз етті. Logistic Regression және R2_behavioral_core үшін бастапқы сценарийде NDCG@100 0.189052 болды, ал кездейсоқ ранжирлеудің орташа мәні 0.010045 құрады; сирек шабуылдар сценарийінде сәйкес мәндер 0.145514 және 0.004943 болды. Мінез-құлықтық контексттің артықшылығы эксперименттік жағдайларға тәуелді болды және баяу әрі біртіндеп жүретін белсенділік кезінде әлсіреді. Түсіндірмелілік пен калибрлеу белгілердің ранжирлеу ұпайына қосатын үлесін, түсіндірмелердің тұрақтылығын, калибрлеу сапасын және ранжирлеу тәртібінің сақталуын бағалау үшін қолданылды.

Нақты журналдық деректердегі 1 760 511 оқиға үшін тек өткен оқиғаларға негізделген бес мінез-құлықтық белгі бойынша басымдық ұпайлары мен бірегей рангтар есептелді. Уақыттық және ұсыну тұтастығына қойылған 9 талаптың барлығы орындалды. Рассталған қауіпсіздік белгілері болмағандықтан, болжамдық тиімділік бағаланбады. Нәтижелер уақыттық және мінез-құлықтық контексттің аутентификация оқиғаларын салыстырмалы талдау басымдығы бойынша ранжирлеуге қосымша ақпарат беретінін көрсетті. Әдістің нақты операциялық ортадағы болжамдық тиімділігін растау үшін рассталған қауіпсіздік белгілері және өрістердің семантикалық құжаттамасы бар журналдық деректерде уақыттық сыртқы валидация жүргізу қажет.

Түйін сөздер: аутентификация оқиғалары, мінез-құлықтық талдау, тәуекелді ранжирлеу, уақыттық валидация, қауіпсіздік оқиғаларын басымдықтау, машиналық оқыту, түсіндірмелілік.

РАНЖИРОВАНИЕ СОБЫТИЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ ПО РИСКУ НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННОГО И ПОВЕДЕНЧЕСКОГО КОНТЕКСТА

Аннотация. События в журналах аутентификации различаются по приоритету анализа, поэтому их ранжирование с учетом временного и поведенческого контекста является значимой задачей информационной безопасности. Цель исследования — оценить дополнительный вклад поведенческого представления в качество ранжирования событий

аутентификации по относительному риску, устойчивость результатов, статистическую обоснованность, объяснимость и калибровку, а также определить техническую реализуемость поведенческой приоритизации на реальных журнальных данных. Методология включала сравнение базовых моделей, абляционный анализ представлений, хронологическое разделение данных на обучающую, валидационную и тестовую выборки, эмпирическое случайное ранжирование, анализ устойчивости и статистической значимости, оценку объяснимости и калибровки, анализ чувствительности к временному горизонту и абляцию групп поведенческих признаков. Основной метрикой являлась $NDCG@100$. В синтетическом эксперименте $R2_behavioral_core$ превзошло $R0_minimal$ по среднему $NDCG@100$: 0.126952 против 0.071314, а также в 10 из 12 комбинаций «сценарий–модель». По 60 парным наблюдениям среднее $\Delta NDCG@100$ составило +0.046803 при 95% доверительном интервале [0.035444, 0.057751]. Для Logistic Regression с $R2_behavioral_core$ $NDCG@100$ составило 0.189052 против среднего случайного значения 0.010045 в базовом сценарии и 0.145514 против 0.004943 в сценарии редких атак. Эффект поведенческого контекста зависел от экспериментальных условий и ослабевал при медленной, распределенной во времени активности.

Для 1 760 511 событий реальных журналов на основе пяти поведенческих признаков, рассчитанных исключительно по предшествующим событиям, были вычислены показатели приоритета и уникальные ранги. Все 9 требований временной целостности и целостности представления выполнены. Из-за отсутствия подтвержденных меток безопасности прогностическая эффективность не оценивалась. Полученные результаты подтверждают дополнительную информационную ценность временного и поведенческого контекста для относительной приоритизации событий, однако подтверждение прогностической эффективности требует временной внешней валидации на реальных журналах с верифицированными метками и семантической документацией полей.

Ключевые слова: события аутентификации, поведенческий анализ, ранжирование рисков, временная валидация, приоритизация событий безопасности, машинное обучение, объяснимость.

Сведение об авторах

Макатов Ерхан Каиржанович	магистр педагогических наук, сеньор-лектор, кафедра «Информационно-коммуникационных технологий», Кокшетауский Университет имени Шокана Уалиханова, Кокшетау, Казахстан, verkhanmakatov@gmail.com , 87071406577
Bishwajeet Pandey	PhD, профессор, Институт технологий и менеджмента GL Bajaj, Грейтер-Нойда, Индия, dr.pandey@ieee.org
Исмуканова Айгерим Наурызбаевна	магистр технических наук, сеньор-лектор, кафедра «Информационно-коммуникационных технологий», Кокшетауский Университет имени Шокана Уалиханова, Кокшетау, Казахстан, aigeraismukan@mail.ru ,
Глок Елена Степановна	магистр технических наук, сеньор-лектор, кафедра «Информационно-коммуникационных технологий», Кокшетауский Университет имени Шокана Уалиханова, Кокшетау, Казахстан, Glok_E@mail.ru
Есмагамбетова Галия Кайратовна	магистр технических наук, сеньор-лектор, кафедра «Информационно-коммуникационных технологий», Кокшетауский Университет имени Шокана Уалиханова, Кокшетау, Казахстан, gal.esm@mail.ru

Авторлар туралы мәлімет

Макатов Ерхан Каиржанович	педагогика ғылымдарының магистрі, сеньор-лектор, "Ақпараттық-коммуникациялық технологиялар" кафедрасы, Шоқан Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан, verkhanmakatov@gmail.com , 87071406577
Bishwajeet Pandey	PhD, профессор, GL Bajaj технологиялар және менеджмент институты, Грейтер-Нойда, Үндістан, dr.pandey@ieee.org

Исмуканова Айгерим Наурызбаевна	техника ғылымдарының магистрі, сеньор-лектор, "Ақпараттық-коммуникациялық технологиялар" кафедрасы, Шоқан Уалиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан, aigera_ismukan@mail.ru ,
Глок Елена Степановна	техника ғылымдарының магистрі, сеньор-лектор, "Ақпараттық-коммуникациялық технологиялар" кафедрасы, Шоқан Уалиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан, Glok_E@mail.ru
Есмағамбетова Галия Кайратовна	техника ғылымдарының магистрі, сеньор-лектор, "Ақпараттық-коммуникациялық технологиялар" кафедрасы, Шоқан Уалиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан, gal.esm@mail.ru

Information about the authors

Makatov Yerkhan Kairzhanovich	Master of Pedagogical Sciences, senior lecturer, Department of Information and Communication Technologies, Shokan Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan, yerkhanmakatov@gmail.com , 87071406577
Bishwajeet Pandey	PhD, Professor, GL Bajaj Institute of Technology and Management, Greater Noida, India, dr.pandey@ieee.org
Ismukanova Aigerim Nauryzbaevna	Master of Technical Sciences, senior lecturer, Department of Information and Communication Technologies, Shokan Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan, aigera_ismukan@mail.ru
Glock Elena Stepanovna	Master of Technical Sciences, senior lecturer, Department of Information and Communication Technologies, Shokan Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan, Glok_E@mail.ru
Esmagambetova Galiya Kairatovna	Master of Technical Sciences, senior lecturer, Department of Information and Communication Technologies, Shokan Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan, gal.esm@mail.ru



УДК 004.94:532.517

МРНТИ 27.35.33

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_9

А.М. Егенова¹, С.Д. Куракбаева¹, А.Т.Калбаева^{1*}, М.А.Амандиков², Н.С.Жуматаев¹

¹Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

²Университет Дружбы народов имени А.Куатбекова, Шымкент, Казахстан

*E-mail: atkalbaeva@mail.ru

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация: Работа посвящена разработке и программной реализации специализированного веб-интерфейса для обработки данных, визуализации и предиктивного анализа коррозионной стойкости защитных покрытий. В статье представлен математический аппарат, объединяющий уравнения диффузии агрессивных сред через полимерные матрицы (второй закон Фика), кинетику электрохимического растворения металлической подложки (уравнение Тафеля) и эмпирические модели деградации защитных слоев. На основе предложенных формализмов с использованием языка Python, фреймворка Streamlit и библиотек Pandas, NumPy и Plotly был спроектирован интерактивный программный комплекс. Разработанный инструмент позволяет автоматизировать ввод и фильтрацию экспериментальных данных, проводить многофакторный регрессионный анализ, строить 2D- и 3D-графические зависимости, а также прогнозировать расчетный ресурс безотказной работы покрытий. Прикладная польза данного труда состоит в формировании удобного цифрового двойника, который помогает значительно уменьшить количество экспериментов в процессе поиска оптимальных характеристик изоляционных составов.

Ключевые слова: сопротивление коррозии, программное решение, компьютерная симуляция, Python, Streamlit, полимерные пленки, методы регрессии, графическое отображение информации.

Введение.

Разрушение металлоконструкций и деградация строительных материалов под воздействием агрессивных сред представляют собой сложную научно-техническую проблему, решение которой требует постоянного совершенствования методов пассивной защиты. Поскольку разрушение протекает без остановок, инженерам приходится непрерывно улучшать подходы к пассивной изоляции. На сегодняшний день в мировой индустрии главная роль здесь отводится защитным барьерам, созданным из синтетических пластиков и кремнийорганических материалов.

Использование силиконовых композиций позволяет изолировать наружные фасады сооружений от капиллярной влаги без нарушения процессов естественного воздухообмена. Паропроницаемость стен при этом сохраняется. Накопление избыточной влаги в микропорах бетона или кирпича предотвращается за счет гидрофобизации внутренних стенок капилляров. Это продлевает срок эксплуатации. Дополнительную изоляцию в

суровых климатических условиях обеспечивают сплошные полимерные оболочки. Износ существенно замедляется.

В качестве основного барьера чаще всего используются поливинилхлоридные и полиэтиленовые пленки, демонстрирующие исключительную инертность к большинству неорганических кислот и щелочей [1]. Предотвращение окисления достигается надежно. Путем нанесения термопластичных составов изолируются внутренние поверхности нефтепромысловых резервуаров, магистральных трубопроводов и химических реакторов. Защита работает эффективно. Традиционные защитные слои формируются также из гибких листовых материалов [2].

Современные полимерные пленки изготавливаются преимущественно на базе водных дисперсий с добавлением эпоксидных смол, стирол-бутадиеновых сополимеров и поливинилацетатного связующего. Адгезия к металлу повышается. Вектор развития научных изысканий в данной области направлен на поиск методов модификации полимерных матриц для работы в экстремальных режимах. Исследования ведутся активно. Перспективным направлением считается введение наноструктурных модификаторов в объем пленки [3].

Использование наноструктурированных добавок. Качественное изменение прочностных и диффузионных свойств полимерных матриц достигается путем диспергирования в их объеме ультрадисперсных наночастиц. За счет крайне малых размеров добавляемые частицы способны плотно занимать пустые микропоры и структурные дефекты. Это делает полимерный каркас гораздо плотнее и в разы усиливает силу сцепления с поверхностью. Как результат, барьер начинает значительно хуже пропускать воду, ионы кислот и молекулы растворенного кислорода.

Разработка самовосстанавливающихся покрытий. Концепция интеллектуальных материалов предполагает способность защитной пленки к автономной регенерации сплошности при возникновении локальных механических повреждений. Для этого применяются микрокапсулы. Внедренные в полимерную матрицу капсулы содержат жидкий мономер, высвобождающийся при раскрытии трещины и полимеризующийся под действием катализаторов. Целостность восстанавливается автоматически. Механическое повреждение не приводит к развитию коррозионного очага [4]. Срок службы растет. Вектор экологической безопасности диктует необходимость замены токсичных хроматных и фосфатных ингибиторов коррозии на биоразлагаемые природные аналоги. Зеленая химия предлагает альтернативы. Экстракты растительного происхождения содержат флавоноиды и танины, способные образовывать на поверхности металла прочные хелатные комплексы. Эффективность защиты высока [5]. Опасные отходы при этом не образуются.

Применение электрохимических методов контроля. Дegradaция диэлектрических свойств полимерного покрытия в процессе насыщения его влагой контролируется методами электрохимического анализа. Применяется импедансная спектроскопия. Поляризационные измерения позволяют зафиксировать возникновение подпленочной коррозии на самых ранних стадиях, когда визуальные дефекты еще отсутствуют. Метод дает точные результаты. Исследование кинетики переноса заряда на границе раздела фаз помогает оценить степень подавления анодных реакций введенными ингибиторами [6]. В процессе проектирования защитных систем возрастает роль математического моделирования. Физико-химические свойства полимеров рассчитываются численно [7]. Моделирование переноса массы и электрохимического потенциала позволяет сократить объем дорогостоящих натурных испытаний и оптимизировать состав композиции [8]. Результаты моделирования ложатся в основу создания долговечных защитных систем [9].

Материалы и методы исследования.

Комплексная оценка защитного действия антикоррозионных покрытий проводилась с совместным использованием лабораторных испытаний и численных расчётных моделей.

Такая комбинация позволяет снизить затраты на эксперименты. Математический аппарат описывает диффузионный, кинетический, механический и электрохимический аспекты взаимодействия в системе «металл — защитная пленка — агрессивная среда». Вычисления проведены последовательно.

Скорость химического взаимодействия коррозионно-активных компонентов с металлической поверхностью описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\frac{dc}{dt} = -kC \quad (1)$$

где:

C — концентрация реагирующих веществ в зоне реакции;

k — кинетическая константа скорости реакции.

Напряженно-деформированное состояние полимерного защитного слоя при внешних механических нагрузках оценивалось методом конечных элементов. Это позволяет выявить места концентрации напряжений. Уравнение статического равновесия принимает вид:

$$\nabla \cdot \sigma + f = 0 \quad (2)$$

где:

σ — тензор напряжений в материале;

f — вектор объёмных нагрузок.

Прогнозирование темпов коррозии в зависимости от набора внешних воздействий выполнялось методом множественной линейной регрессии. Совокупное влияние факторов оценивалось совместно. Регрессионная модель записывается в виде:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + \epsilon \quad (3)$$

где y — исследуемая переменная (например, скорость коррозионного разрушения);

x_i — влияющие факторы;

b_i — регрессионные коэффициенты;

ϵ — случайная ошибка модели.

Применение регрессионного подхода повышает точность прогнозирования коррозионного поведения.

Чтобы учесть постепенное разрушение полимерной структуры под влиянием воды и нагрева, показатель проникновения агрессивных веществ D рассматривается как переменная величина и выражается через уточненную зависимость:

$$D(t, W) = D_0 \cdot \exp(\alpha \cdot W(t) + \beta \cdot \frac{t}{t_{service}}) \quad (4)$$

где:

D_0 — начальный коэффициент диффузии сухой пленки;

$W(t)$ — текущее влагонасыщение покрытия;

α, β — эмпирические коэффициенты деструкции полимерной сетки;

$t_{service}$ — нормативный срок службы покрытия.

Данная модель позволяет определить момент достижения агрессивного агента металлической подложки.

Деградация полимерного покрытия под действием ультрафиолетового излучения и влаги аппроксимируется уравнением убывания массы:

$$\frac{dM}{dt} = -kM \quad (5)$$

где:

M — остаточная масса (доля) покрытия;

k — константа скорости деградации материала.

Числовое решение данного уравнения характеризует устойчивость покрытия к эксплуатационному старению.

Кинетика электрохимических реакций на межфазной границе описывается уравнением Тафеля:

$$i = i_0 \left(e^{\frac{\alpha n F \eta}{RT}} - e^{-\frac{(1-\alpha) n F \eta}{RT}} \right) \quad (6)$$

где:

i — плотность тока коррозии;

i_0 — ток обмена, характеризующий реакционную способность системы;

η — перенапряжение на электроде;

α — коэффициент переноса заряда;

n — число электронов, участвующих в реакции;

F — постоянная Фарадея;

R — универсальная газовая постоянная;

T — абсолютная температура.

Краевое условие на границе раздела «покрытие – металлическая подложка» $x = L$ связывает диффузионный поток $J(L, t)$ с кинетикой электрохимического растворения Тафеля:

$$i_{corr}(t) = i_0 \cdot \frac{C(L,t)}{C_{sat}} \cdot \exp\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right) \quad (7)$$

Сопоставление значений тока коррозии даёт количественную оценку барьерных свойств покрытия.

Ресурс защитного барьера рассчитывался на основе эмпирической модели долговечности:

$$t_{fail} \approx \frac{L^2}{D} + \frac{1}{k} \quad (8)$$

где:

L — прогнозируемый срок службы покрытия;

h — толщина нанесённого слоя;

D — коэффициент диффузии агрессивных веществ;

v — скорость абразивного износа поверхности.

Численное моделирование и компьютерная симуляция применяются как мощные инструменты исследования коррозионных процессов и разработки систем защиты [11, 12]. Современное программное обеспечение описывает перенос ионов и нейтральных частиц в электролите, а также распределение тока в металлических конструкциях. Специализированные модули коррозии позволяют воспроизводить реакции переноса заряда на границе металл–электролит с опорой на встроенную термодинамическую базу данных электродных потенциалов. Моделирование ведётся в одно-, двух- и трёхмерной постановке методами конечных и граничных элементов. Круг имитируемых явлений охватывает гальваническую, точечную, щелевую, атмосферную и общую коррозию [13], кислотно-щелочное разрушение в нефтегазовых системах, коррозию арматуры в бетоне и воздействие блуждающих токов. В основе всех этих сценариев лежат единые

электрохимические закономерности переноса заряда и массы. Граничные условия и поверхностные реакции задаются гибко [14]. Электролит может быть задан как тонкий плёночный слой, пористая среда или жидкая фаза. Платформа допускает сопряжение модуля коррозии с модулями теплопередачи и строительной механики, что открывает возможность моделирования коррозионного растрескивания под напряжением и деградации бетонного покрытия [15].

Программный комплекс для расчёта коррозионных параметров построен на ключевых библиотеках экосистемы Python, каждая из которых выполняет конкретную функцию:

- `streamlit` (псевдоним `st`): фреймворк для создания интерактивного веб-интерфейса без применения HTML, CSS или JavaScript. Библиотека обрабатывает взаимодействие с пользователем, обновление виджетов и управление состоянием сессии (`st.session_state`). Предоставляются готовые элементы управления: кнопки, ползунки, поля ввода, загрузчики файлов, а также методы отображения таблиц, графиков и математических формул.

- `pandas` (псевдоним `pd`): базовый инструмент для работы с данными в формате `DataFrame`. В приложении используется для:

- чтения данных из CSV и Excel-файлов (`pd.read_csv`, `pd.ExcelFile`); — структурирования информации для удобного доступа и манипуляций;

- фильтрации, сортировки и обработки пропущенных значений (`dropna`, `fillna`, `pd.NA`);

- приведения столбцов к числовому типу (`pd.to_numeric`, `errors='coerce'`);

- подготовки данных для регрессионного анализа и визуализации;

- формирования итоговых таблиц для вывода на экран и выгрузки; использования `st.data_editor` для интерактивного редактирования данных пользователем.

- `numpy` (псевдоним `np`): библиотека для высокопроизводительных числовых операций. Используется совместно с `pandas` и `statsmodels` для работы с многомерными массивами данных.

Применение описанного метода позволяет определить расчётный период безотказной защиты металла и подобрать параметры покрытия, соответствующие конкретным условиям эксплуатации.

Результаты и их обсуждение.

Проектирование эффективных систем защиты от коррозии требует детального изучения механизмов переноса массы в объеме диэлектрической пленки. Чтобы автоматизировать повторяющиеся вычисления и позволить анализировать результаты без задержек, исследователи создали собственное приложение на Python. Его интерактивная веб-оболочка функционирует с помощью библиотеки `Streamlit`.

Программа представляет собой веб-приложение с интуитивно понятным интерфейсом, предназначенное для инженеров, исследователей или профессионалов, работающих с данными о коррозионной стойкости материалов и покрытий. Он предлагает два основных аналитических модуля: регрессионный анализ для определения зависимости между факторами и показателями и модуль анализа коррозии для сравнения показателей различных материалов с течением времени. Приложение имеет следующую файловую структуру, характерную для многостраничных приложений `streamlit`:

- `app.py`: является точкой доступа, устанавливает общие настройки приложения, отображает домашнюю страницу с приветствием и описанием.

- подстраницы/: подпакет со скриптами отдельных страниц. Файлы с кодом для отдельных рабочих окон сгруппированы в отдельную директорию. За счет этого `Streamlit` может самостоятельно управлять переходами между страницами и выстраивать удобную навигацию для пользователя.

Раздел "Главная" (`app.py`) приведены на рисунке 1. Цель этого раздела дать общее введение в приложение и служит отправной точкой. Его основные функции:

- регулирует общие параметры страницы (`st.set_page_config`): широкий макет (`layout="wide"`), заголовок вкладки браузера, значок, статус боковой панели по умолчанию.
- Отображает основную тему и вводный текст, описывающий цель приложения и доступные разделы;
- перенаправляет пользователя на использование боковой панели для навигации;
- Streamlit показывает, что благодаря Session State данные могут храниться между страницами.

Пользователь имеет возможность вводить исходные параметры симуляции (коэффициенты диффузии, константы скоростей реакций, толщины слоев) вручную через интерактивные поля ввода или загружать готовые экспериментальные данные в формате таблиц CSV (рисунок 1). Импорт выполняется мгновенно.

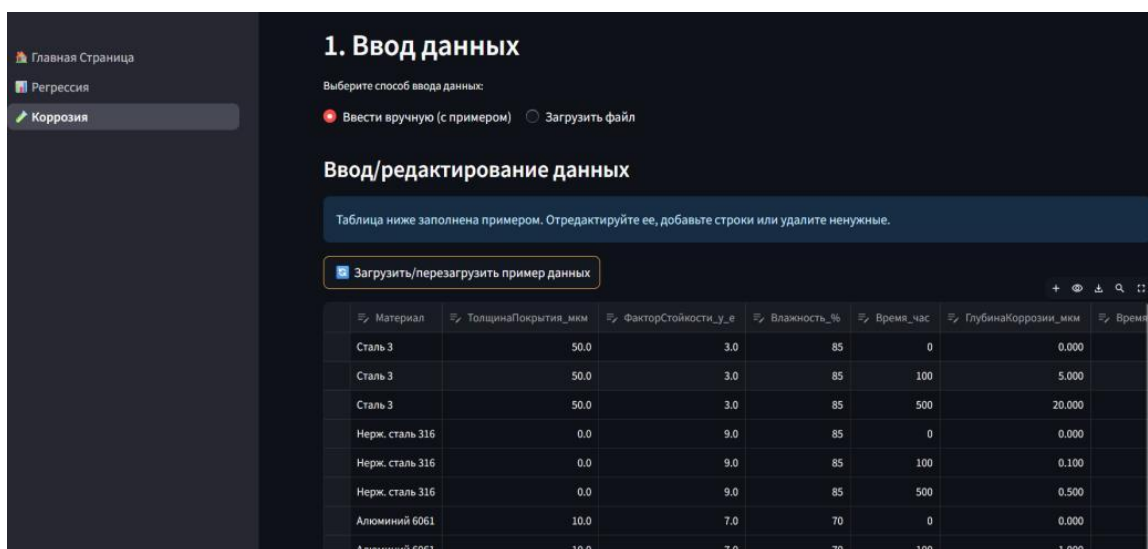


Рисунок 1 – Окно ввода данных разрабатываемого программного комплекса

После считывания данных система запускает вычислительные модули, рассчитывающие временную динамику изменения концентраций коррозионно-активных агентов и падение защитных свойств во времени.

Окно проверки данных выполняет следующие действия:

- проверяет наличие обязательных столбцов ('Материал', 'Время_н').
- пытается преобразовать известные числовые столбцы в числовой формат (`errors='coerce'`).
- проверяет наличие NaN в обязательных столбцах после ввода/загрузки.
- предварительный просмотр: в складном блоке (`st.expander`) отображает первые строки данных, введенных после операции преобразования, и информацию о типах данных.
- предупреждает о существовании NaN

Графики строятся автоматически (рисунок 2). Результаты выводятся на интерактивный холст.

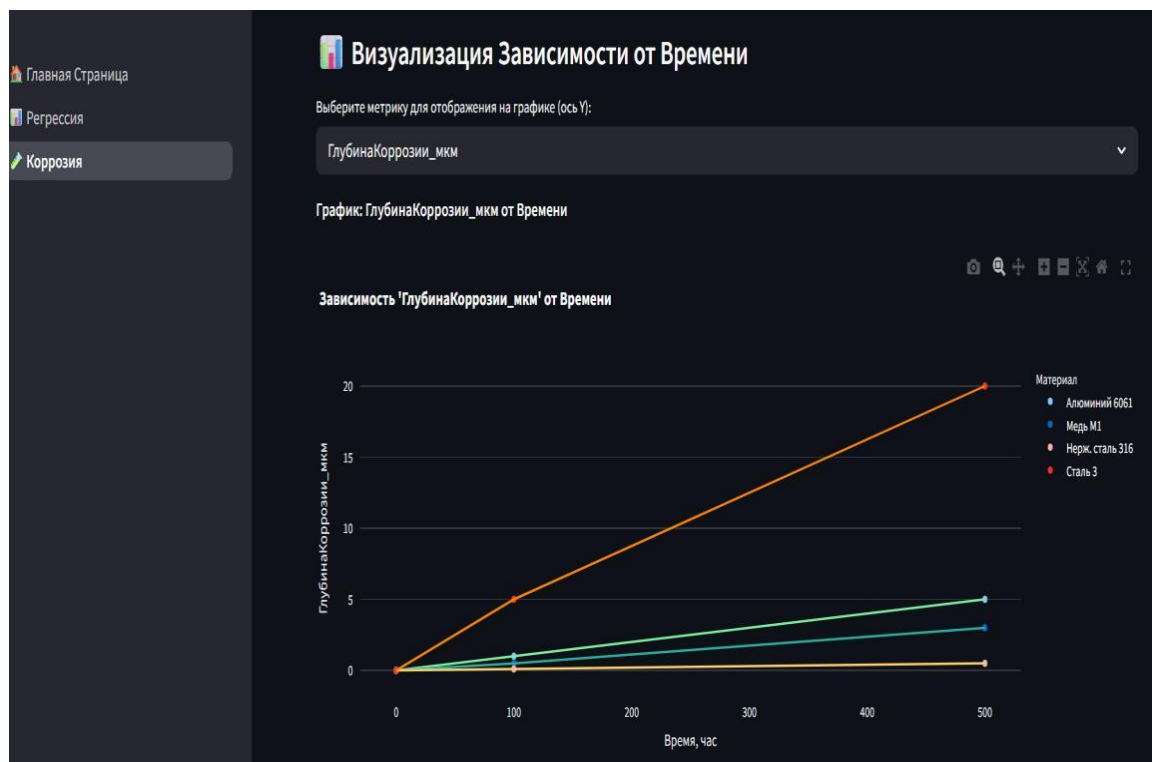


Рисунок 2 – Сравнение временных зависимостей показателей коррозии

Дополнительное сравнение коррозионной стойкости выполняет следующие функции:

- Предоставляет поле выбора для выбора конкретного материала из списка.
- В виде карт показывает набор основных показателей для выбранного материала из сводной таблицы (st.metric) использование специальной функции для форматирования значений и обработки разрешений. Сводная таблица организована в столбцы.
- Сводную таблицу можно скачать (в форматах CSV и Excel).

Программа осуществляет автоматическое ранжирование исследуемых образцов по уровню их коррозионной стойкости на основе расчета времени прорыва защитного слоя t_{fail} . Данные сводятся в общую таблицу. Для наглядного сравнения свойств различных покрытий в системе предусмотрен модуль детального анализа, позволяющий выводить ключевые параметры выбранного материала с помощью интерактивных карточек метрик (рисунок 3). Это упрощает выбор материала. Сформированные таблицы и графики могут быть экспортированы для дальнейшей статистической обработки.

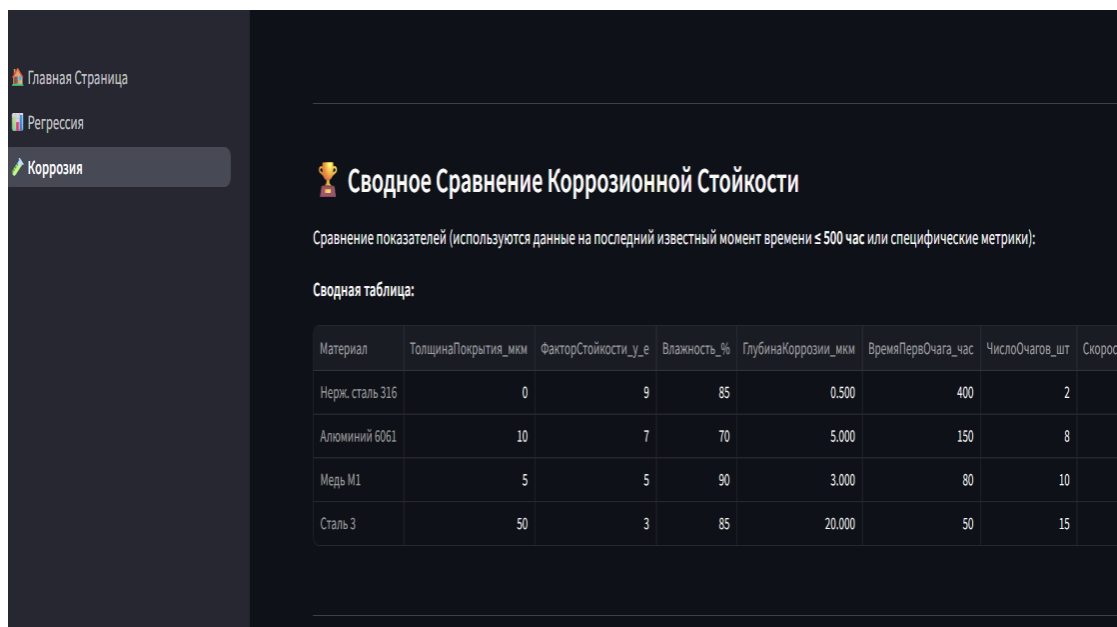


Рисунок 3 – Дополнительное окно сравнения коррозионной стойкости

В разделе Визуализация рассматривается график сравнения фактических и прогнозных значений Y (plotli). OLS генерируется линией тренда и осевыми гистограммами (рис.4).

- Создает график остатков Vs. Предполагаемые значения (plotly.express.scatter) для анализа распределения отходов.

- Рисует 3D-график, показывающий фактические точки данных и плоскость (или поверхность) регрессии в трехмерном пространстве, если выбраны ровно два фактора (plotly.graph_objects).

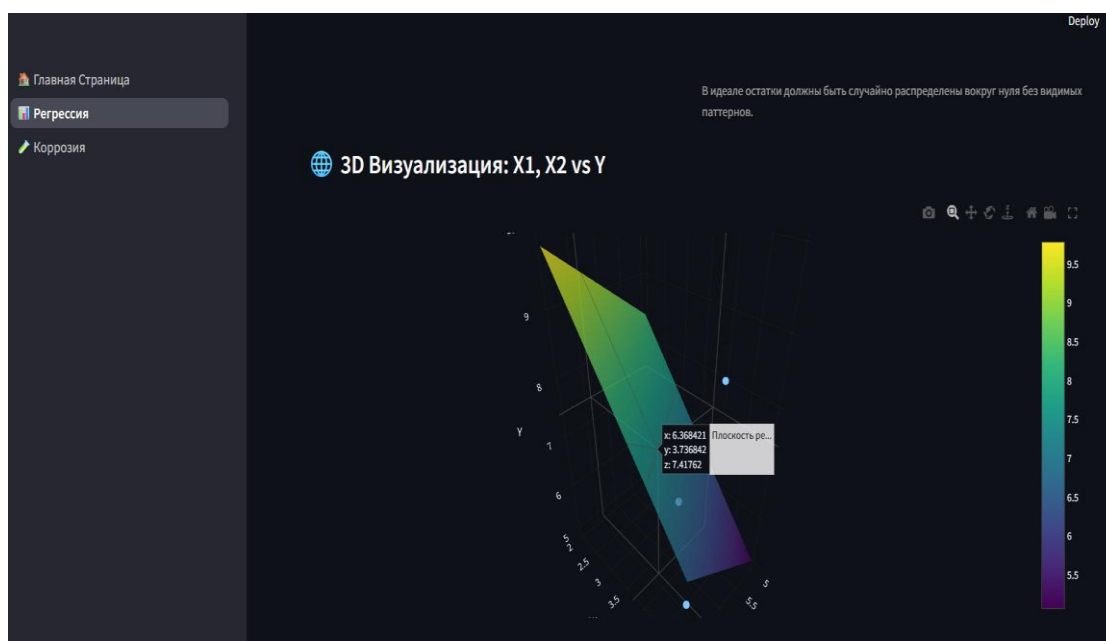


Рисунок 4 – Окно трехмерной визуализации

Загрузка результатов позволяет пользователю загружать следующие данные:

- таблица с исходными данными, фактическими значениями Y , прогнозируемыми значениями Y и остатками (в форматах CSV и Excel).

- таблица с коэффициентами регрессии и их краткая статистика (в форматах CSV и Excel).

- обработка ошибок: улавливает фактические ошибки (например, `np.linalg.LinAlgError` мультиколлинеарный) и общие исключения, сообщения об ошибках и следы стека для отладки. Загрузка результатов организована так, как показано на рисунке 5.

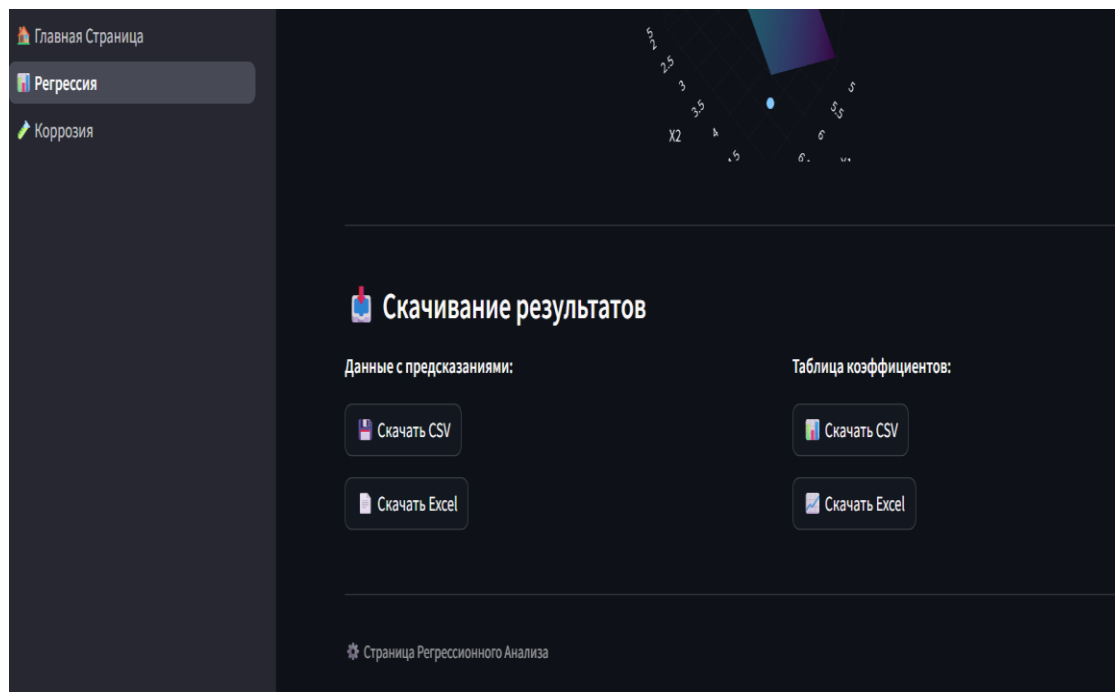


Рисунок 5 – Окно загрузки данных

Перспективы интеграции программного комплекса с аппаратно-сенсорными системами (IoT).

Для трансформации разработанного программного комплекса в полноценную систему предиктивного мониторинга и предиктивного обслуживания (Predictive Maintenance) спроектирована концептуальная архитектура двунаправленного информационного обмена с внешними аппаратно-сенсорными модулями.

Архитектура построена на использовании промышленных протоколов передачи данных в реальном времени:

1. Протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport): применяется для периодического сбора первичных метрик (уровня относительной влажности, температуры окружающей среды, электрического сопротивления полимерной матрицы и тока подпленочной коррозии) с распределенной сети физических датчиков (коррозионных трекеров и влагомеров), смонтированных на контролируемых объектах.

2. REST API на базе фреймворка FastAPI/Flask: выступает промежуточным связующим звеном (middleware) между брокером сообщений и веб-приложением на Streamlit. Через API-эндпоинты выполняется валидация, первичная фильтрация и запись поступающих временных рядов в базу данных (PostgreSQL/TimescaleDB).

Считанные в режиме реального времени параметры среды автоматически передаются в расчетное ядро программы. Алгоритм осуществляет динамический перерасчет текущего коэффициента диффузии $D(W, t)$ и обновляет прогноз остаточного ресурса покрытия t_{fail} . При превышении критических пороговых значений тока коррозии i_{corr} или ускоренной деградации полимера веб-интерфейс формирует автоматическое оповещение для инженерно-технического персонала.

Предложенная схема интеграции закладывает основу для поэтапного перехода разработанной модели к индустриальному формату цифрового двойника антикоррозионной защиты.

Заключение.

В результате выполненной научно-исследовательской работы спроектировано и реализовано кроссплатформенное программное обеспечение на базе веб-фреймворка Streamlit. Успешная апробация созданного инструментария подтвердила его высокую надежность и эффективную функциональность при обработке массивов экспериментальных данных и численном моделировании процессов переноса массы и заряда в антикоррозионных пленках.

Путем объединения уравнений диффузии Фика, электрохимической кинетики Тафеля и моделей механического износа в единую расчетную систему была достигнута высокая точность прогнозирования остаточного ресурса покрытий. Расчеты подтверждены лабораторными тестами. Практическая ценность предложенного подхода заключается в возможности оптимизации толщины и химического состава наносимого слоя непосредственно на этапе проектирования. Это исключает необходимость проведения долгих натурных тестов.

Интеграция разработанного программного комплекса в контур промышленного предиктивного обслуживания технологического оборудования позволит существенно снизить затраты на внеплановый ремонт. Надежность повышается многократно. Дальнейшее развитие проекта предполагает подключение баз данных коммерческих материалов и адаптацию расчетных модулей для работы с датчиками систем мониторинга коррозии в реальном времени.

Список использованной литературы

1. Haldhar, R., Kim, S.-C., Berdimurodov, E., Chaudhary, M. (2021). Corrosion Inhibitors: Industrial Applications and Commercialization. In: Sustainable Corrosion Inhibitors II: Synthesis, Design, and Practical Applications. ACS Symposium Series; (1404), 219–235. DOI: 10.1021/bk-2021-1404.ch010.
2. Zakeri, A., Bahmani, E. & Sabour Rouh Aghdam, A. (2022). Plant extracts as sustainable and green corrosion inhibitors for protection of ferrous metals in corrosive media: A mini review. Corrosion Communications; 5, 25–38. DOI: 10.1016/j.corcom.2022.03.002.
3. Al Jahdaly, B.A., Maghraby, Y.R., Ibrahim, A.H., Shouier, K.R., Alturki, A.M. & El-Shabasy, R.M. (2022). Role of green chemistry in sustainable corrosion inhibition: A review on recent developments. Materials Today Sustainability; 20, 100242. DOI: 10.1016/j.mtsust.2022.100242.
4. Khan, M.A.A., Irfan, O.M., Djavanroodi, F. & Asad, M. (2022). Development of Sustainable Inhibitors for Corrosion Control. Sustainability; 14(15), 9502. DOI: 10.3390/su14159502.
5. Aslam, R., Mobin, M., Zehra, S. & Aslam, J. (2022). A comprehensive review of corrosion inhibitors employed to mitigate stainless steel corrosion in different environments. Journal of Molecular Liquids; 364, 119992. DOI: 10.1016/j.molliq.2022.119992.
6. Lee, H., Gray, S., Zhao, Y. & Castelluccio, G.M. (2022). Machine learning applied to identify corrosive environmental conditions. Frontiers in Materials; 9, 830260. DOI: 10.3389/fmats.2022.830260.
7. Ma, S., Du, Y., Wang, S. & Su, Y. (2023). Application of machine learning in material corrosion research. Corrosion Reviews; 41(4), 417–426. DOI: 10.1515/corrrev-2022-0089.
8. Ma, J., Dai, J., Guo, X., Fu, D., Ma, L., Keil, P., Mol, A. & Zhang, D. (2023). Data-driven corrosion inhibition efficiency prediction model incorporating 2D–3D molecular graphs and inhibitor concentration. Corrosion Science; 222, 111420. DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111420.

9. Hakimian, S., Pourrahimi, S., Bouzid, A.-H. & Hof, L.A. (2023). Application of machine learning for the classification of corrosion behavior in different environments for material selection of stainless steels. *Computational Materials Science*; 228, 112352. DOI: 10.1016/j.commatsci.2023.112352.
10. Silakorn, P., Jantrakulchai, N., Wararatkul, N., Wanwilairat, S., Kangkachit, T., Techapiesancharoenkij, R., Rakthanmanon, T. & Hanlumyuang, Y. (2023). Top-of-line corrosion via physics-guided machine learning: A methodology integrating field data with theoretical models. *Journal of Petroleum Science and Engineering*; 221, 110558. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110558.
11. Vangrunderbeek, V., Coelho, L.B., Zhang, D., Li, Y., Van Ingelgem, Y. & Terry, H. (2023). Exploring the potential of transfer learning in extrapolating accelerated corrosion test data for long-term atmospheric corrosion forecasting. *Corrosion Science*; 225, 111619. DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111619.
12. Zeng, C., Neils, A., Lesko, J. & Post, N. (2024). Machine learning accelerated discovery of corrosion-resistant high-entropy alloys. *Computational Materials Science*; 237, 112925. DOI: 10.1016/j.commatsci.2024.112925.
13. Kuang, J. & Long, Z. (2024). Prediction model for corrosion rate of low-alloy steels under atmospheric conditions using machine learning algorithms. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*; 31, 337–350. DOI: 10.1007/s12613-023-2679-5.
14. Özkan, C., Sahlmann, L., Feiler, C., Zheludkevich, M.L., Lamaka, S.V., Sewlikar, P., Kooijman, A., Taheri, P., Mol, A. (2024). Laying the experimental foundation for corrosion inhibitor discovery through machine learning. *npj Materials Degradation*; 8, 21. DOI: 10.1038/s41529-024-00435-z.
15. Dong, Z., Ding, L., Meng, Z., Xu, K., Mao, Y., Chen, X., Ye, H. & Poursaei, A. (2024). Machine learning-based corrosion rate prediction of steel embedded in soil. *Scientific Reports*; 14, 18194. DOI: 10.1038/s41598-024-68562-w.

ҚОРҒАНЫШ ҚАПТАМАЛАРЫНЫҢ КОРРОЗИЯҒА ТӨЗІМДІЛІК ПАРАМЕТРЛЕРІН БАҒАЛАУ МЕН ВИЗУАЛИЗАЦИЯЛАУҒА АРНАЛҒАН БАҒДАРЛАМАЛЫҚ КЕШЕНДІ ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа: Жұмыс деректерді өңдеуге, визуализацияға және қорғаныс жабындарының коррозияға төзімділігін болжамды талдауға арналған арнайы веб-интерфейсті әзірлеуге және бағдарламалық қамтамасыз етуге бағытталған. Мақалада агрессивті орталардың диффузия теңдеулерін полимерлі матрицалар (Фиктің екінші заңы), металл субстраттың электрохимиялық еру кинетикасы (Тафель теңдеуі) және қорғаныс қабаттарының деградациясының эмпирикалық модельдері арқылы біріктіретін математикалық аппарат ұсынылған. Ұсынылған формализмдер негізінде Python тілін, Streamlit шеңберін және pandas, NumPy және plotly кітапханаларын қолдана отырып, интерактивті бағдарламалық жасақтама жасалды. Әзірленген құрал эксперименттік деректерді енгізу мен сүзуді автоматтандыруға, көп факторлы регрессиялық талдау жүргізуге, 2D және 3D графикалық тәуелділіктерді құруға, сондай - ақ жабындардың ақаусыз жұмысының есептік ресурсын болжауға мүмкіндік береді. Бұл жұмыстың қолданбалы пайдасы оқшаулағыш қосылыстардың оңтайлы сипаттамаларын іздеу процесінде эксперименттер санын едәуір азайтуға көмектесетін ыңғайлы цифрлық егізді қалыптастырудан тұрады.

Түйін сөздер: коррозияға төзімділік, бағдарламалық шешім, компьютерлік модельдеу, Python, Streamlit, полимерлі пленкалар, регрессия әдістері, ақпаратты графикалық түрде көрсету.

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE FOR ASSESSING AND VISUALIZING CORROSION RESISTANCE PARAMETERS OF PROTECTIVE COATINGS

Abstract: The work is devoted to the development and software implementation of a specialized web interface for data processing, visualization and predictive analysis of corrosion resistance of protective coatings. The article presents a mathematical apparatus combining the equations of diffusion of aggressive media through polymer matrices (Fick's second law), the kinetics of electrochemical dissolution of a metal substrate (Tafel equation) and empirical models of degradation of protective layers. Based on the proposed formalisms using Python, the Streamlit framework, and the Pandas, NumPy, and Plotly libraries, an interactive software package was designed. The developed tool makes it possible to automate the input and filtering of experimental data, perform multifactorial regression analysis, build 2D and 3D graphical dependencies, and predict the estimated uptime of coatings. The applied benefit of this work is the formation of a convenient digital twin, which helps to significantly reduce the number of experiments in the process of searching for optimal characteristics of insulating compounds.

Keywords: corrosion resistance, software solution, computer simulation, Python, Streamlit, polymer films, regression methods, graphical data visualization.

Сведение об авторах

Егенова Алия Мейрамбековна	PhD, старший преподаватель, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан, e-mail: aegenova@mail.ru.
Куракбаева Севара Джумагалиевна	кандидат технических наук, профессор, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан, e-mail: sevam@mail.ru.
Калбаева Айжан Тажихановна	кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан, e-mail: atkalbaeva@mail.ru.
Амандиков Мадамин Алдамурадович	кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры «Информатика и математика», Университет Дружбы народов имени А.Куатбекова, Шымкент, Казахстан, e-mail: amandikov59@bk.ru
Жуматаев Нурлыбек Срайлович	PhD, доцент, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан, e-mail: nuralmiras@mail.ru

Авторлар туралы мәлімет

Егенова Алия Мейрамбековна	PhD, аға оқытушы, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: aegenova@mail.ru.
Куракбаева Севара Джумагалиевна	техника ғылымдарының кандидаты, профессор, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: sevam@mail.ru.
Калбаева Айжан Тажихановна	техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: atkalbaeva@mail.ru.
Амандиков Мадамин Алдамурадович	техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Информатика және математика» кафедрасының меңгерушісі, А. Куатбеков атындағы Халықтар Достығы университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: amandikov59@bk.ru
Жуматаев Нурлыбек Срайлович	PhD, доцент, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: nuralmiras@mail.ru

Information about the authors

Yegenova Aliya Meirambekovna	PhD, Senior Lecturer, M. Auezov South Kazakhstan University, city Shymkent, Kazakhstan, e-mail: aegenova@mail.ru.
Kurakbayeva Sevara Dzhumagalievna	Candidate of Technical Sciences, Professor, M. Auezov South Kazakhstan University, city Shymkent, Kazakhstan, e-mail: sevam@mail.ru.
Kalbayeva Aizhan Tazhikhanovna	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, M. Auezov South Kazakhstan University, city Shymkent, Kazakhstan, e-mail: atkalbaeva@mail.ru.
Amandikov Madamin Aldamuradovich	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Science and Mathematics, Peoples' Friendship University named by A.Kuatbekov, city Shymkent, Kazakhstan, e-mail: amandikov59@bk.ru
Zhumataev Nurlybek Sraiovich	PhD, Associate Professor, M. Auezov South Kazakhstan University, city Shymkent, Kazakhstan, e-mail: nuralmiras@mail.ru



КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ, ПРИБОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР, АСПАП ЖАСАУ ЖӘНЕ АВТОМАТТАНДЫРУ
COMPUTER SCIENCE, INSTRUMENTATION AND AUTOMATION

ӘОЖ 681.586:531.787

ҒТАХА 59.14.23

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_10

**Ж. Р. Уалиев¹, П. Г. Михайлов², А. И. Ақжолова^{1*}, А. О. Кабдолдина³,
 А.Ю. Бектилезов³**

¹Сандық техника және технологиялар институты, Алматы, Қазақстан

²Қазақстан инновациялық және телекоммуникациялық университеті, Орал, Қазақстан

³Қ.И. Сәтбаев атындағы қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

*E-mail: asel_zhalyn@mail.ru

**ЭКСТРЕМАЛДЫ ЖАҒДАЙЛАРДА ЖҰМЫС ІСТЕУГЕ АРНАЛҒАН ЖАРТЫЛАЙ
 ӨТКІЗГІШ СЕНСОРЛАРДЫҢ ЭЛЕКТРОФИЗИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН
 ЗЕРТТЕУ**

Аңдатпа. Қысым пульсацияларын авиациялық техникада өлшеу кезінде сезгіш элемент, жалғаушы арналар, корпус қуыстары және қоректендіру схемасы нәтижеге бірлесіп әсер етеді. Олардың үлестерін ажырату экстремалды жағдайларға арналған жартылай өткізгіш сенсорларды жобалау үшін қажет. Жұмыстың мақсаты — айқын берілген жорамалдар негізінде жиіліктік жасауапты, жергілікті температуралық өтемдеуді және белгісіздіктің таралуын есептеу, сондай-ақ қолда бар сипаттамалар бойынша параметрлерді анықтаудың шектеулерін көрсету. Жұқа пластина теңдеуі, екінші ретті динамикалық буындар, тұтқырлық пен жылулық шығындары бар түтіктердің ауысу матрицалары және аддитивті децибелдік белгісіздік моделі қолданылды. Есептеулер шектік жағдайлармен, тәуелсіз сандық өрнектермен және Монте-Карло әдісімен тексерілді. Бір ғана жолақ шекарасы меншікті жиілік пен демпфирлеуді бірге анықтамайтыны көрсетілді. 65 кГц есептік жолақ және 0,01–0,10 демпфирлеу аралығы қабылданғанда ғана меншікті жиіліктің шамамен 195 кГц төменгі бағасы алынады. Мойын диаметрі 0,8 мм, ұзындығы 1 мм және қуыс көлемі 1 мм³ болатын сценарийде толық каскад 25,728 кГц акустикалық шың мен 7,981 кГц жолақ береді. Ұзындығы 20 мм, радиусы 0,40 мм зонд қосылғанда сол тізбектің жолағы 0,981 кГц болады. Қуыстың жылулық шығыны мен мембрананың кері акустикалық жүктемесі бұл есепке кірмейді. Қабылданған температуралық коэффициенттер және 6 В қорек кезінде шектелген топология қажетті жергілікті өтемдеудің 13,846 пайызын қамтамасыз етеді; басқа коэффициентте бірінші туындының нөлге тең болуы толық диапазондағы тұрақтылықты дәлелдемейді. Екі шартты бюджет үшін қамту коэффициенті екіге тең кеңейтілген белгісіздік 2,491 және 0,980 дБ, ал 95 пайыздық қамту аралығының жарты ені 2,214 және 0,950 дБ болды. Нәтижелер жаңа эксперименттік валидация немесе нақты аспаптың расталған дәлдігі ретінде ұсынылмайды. Жұмыс модель жорамалдарын тексеруге және кейінгі өлшеу хаттамасын құруға негіз береді.

Түйін сөздер: пьезорезистивті сенсор, жиіліктік жасауап, қуыс резонансы, акустикалық зонд, параметрлерді анықтау, температуралық өтемдеу, өлшеу белгісіздігі, сандық верификация.

Кіріспе.

Авиациялық техникадағы қысым пульсацияларын өлшеуде мембрана, жалғаушы арналар, корпус қуысы және қорек схемасы нәтижеге бірлесіп әсер етеді. MEMS сенсорларының конструкциясы мен корпустауы [1], 4H-SiC материалдарының экстремалды жағдайлардағы қасиеттері [2] және транзисторлық температуралық өтемдеу [3] бойынша жұмыстар осы әсерлерді бөлек бағалау қажеттігін көрсетеді.

Түтік-қуыс жүйелерінің теориясы [4] Берг-Тейдеман тәсіліне [5] негізделген. Акустикалық зондтардың сипаттамаларын түзету [6], корпусталған сенсорлардың жиіліктік сипаттамасы [7] және қуыстағы жылу алмасуды ескеретін модель [8] белгілі болғандықтан, каскадты сипаттаудың өзі бұл жұмыста жаңалық ретінде ұсынылмайды.

ПД сериялы сенсорлар жөніндегі [9] жұмыста салыстырмалы әдістің дәлдігі ± 1 дБ (20 Гц – 65 кГц), жабық конструкцияның жиілік шегі ≈ 30 кГц, ал ашық конструкцияның диапазоны 0–75 кГц деп көрсетілген. Әдістің дәлдігі нормаланған амплитудалық-жиіліктік сипаттаманың (АЖС) ± 1 дБ жолағымен бірдей емес, сондықтан бұл мәндер төменде тек шартты нысана ретінде пайдаланылады.

Жұмыстың мақсаты — айқын берілген жорамалдар негізінде өлшеу арнасының динамикалық, температуралық және метрологиялық әсерлерін есептеу және қолда бар сипаттамалар бойынша параметрлерді анықтаудың шектерін көрсету. Жұмыстың үлесі: бір ± 1 дБ жолақ шекарасы бойынша меншікті жиілік пен демпфирлеуді бірге анықтау мүмкін еместігін сандық көрсету; бірдей анықталған толық каскад үшін жолақ пен шыңдарды сәйкестендіру; жергілікті температуралық өтемдеуді схема топологиясымен байланыстыру; $U(k=2)$ кеңейтілген белгісіздігі мен 95 % қамту аралығын ажырату. Жаңа эксперимент жүргізілмеді; есептеу верификациясы эксперименттік валидациядан ажыратылады [10].

Материалдар мен зерттеу әдістері.

Кіріс деректер және шекаралық шарттар

Геометрия мен коэффициенттердің мәндері және олардың дәлелдік мәртебесі 1-кестеде берілген. Нақты мембраналардың бірдейлігі, қорғаныш торы және жылулық шекаралар расталмаған. Brüel & Kjaer 4136 микрофоны үшін паспорттағы 4 Гц – 70 кГц, ± 2 дБ диапазон [11] нақты экземплярдың калибрлеу қалдығын анықтамайды.

1 кесте – Негізгі кіріс деректердің мәндері мен дәлелдік мәртебесі

Шама	Мәні	Мәртебесі және қолданылу шарты
Салыстырмалы әдіс дәлдігі	± 1 дБ; 20 Гц – 65 кГц	[9], 81-бет; АЖС тегістігінің критерийі емес
Конструкциялардың жиілік диапазоны	жабық: ≈ 30 кГц; ашық: 0–75 кГц	[9], 82-бет; B шамасымен теңдігі расталмаған
Есептік жолақ нысаналары	$B = 65, 70$ және 30 кГц	Осы жұмыста анықталған шартты ± 1 дБ критерийі
Мембрана параметрлері	$f_0 = 211,6$ кГц; $\zeta = 0,05$	Салыстыру үшін бекітілген сценарий; өлшенген параметрлер емес
Қуыс және мойын	$V = 1,0$ мм ³ ; $d = 0,8$ мм; $l = 1,0$ мм	Жорамал геометрия; $l_{\text{eff}} = l + 0,85d = 1,68$ мм
Зонд	$L = 20$ мм; $R = 0,40$ мм	Есептік геометрия; толық тізбекте $V = 1,0$ мм ³
Бір түтік моделінің соңғы көлемі	$V_v = 1,05$ мм ³	$\approx 3,65$ кГц шынды алу үшін таңдалған сценарий; тәуелсіз өлшем емес
Ауа	$\rho_0 = 1,204$ кг/м ³ ; $c = 343,2$ м/с; $\mu = 1,81 \cdot 10^{-5}$ Па·с; $\gamma = 1,4$; $Pr = 0,71$	20 °С маңындағы есептік тұрақтылар; экстремалды температураға экстраполяцияланбайды

Шама	Мәні	Мәртебесі және қолданылу шарты
Температуралық коэффициенттер	$\alpha_\pi = -0,27 \text{ \%}/\text{K}$; $\beta = -2 \text{ мВ}/\text{K}$; $U_{\text{EB}} = 0,65 \text{ В}$	Жергілікті есепке қабылданған мәндер; нақты элементтің сертификатталған параметрлері емес

Қысым p пен көлемдік шығын q үшін $\exp(j\omega t)$ уақыттық келісімі және $\omega = 2\pi f$ қолданылады. Түтік қабырғалары қатты және изотермиялық, орташа ағын жоқ деп қабылданды. Беріліс функциясы төменгі жиіліктегі мәніне нормаланған; электроника буыны $W_e = 1$. Температуралық есеп жұмыс нүктесінің маңына қатысты. Есептеу тізбегінің құрылымы 1-суретте көрсетілген.



1 сурет – Қысымның кірістен мембранаға берілу тізбегі: $A = T_{\text{rad}} T_1 T_2$, соңғы жүктеме Z_V ; мембрана динамикасы W_3 және нормаланған электроника $W_e = 1$. Зонд болмаған кезде T_1 бірлік матрицаға тең. Мембрананың акустикалық кері жүктемесі ескерілмейді

Мембрана моделі

Периметрі қатаң бекітілген, тиімді изотропты дөңгелек пластина үшін қозғалыс теңдеуі:

$$D\nabla^4 w - N_r \nabla^2 w + \rho_s h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = p(r, t), \quad D = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (1)$$

мұнда w – иілу; D – цилиндрлік қатаңдық; E , ν – тиімді серпімділік модулі мен Пуассон коэффициенті; $N_r \geq 0$ – ұзындық бірлігіне келетін радиалды созу күші, Н/м; a , h – радиус пен қалыңдық; ρ_s – материал тығыздығы. Кремний анизотропиясын тиімді E , ν шамаларымен алмастыру – жорамал. $w(a, t) = 0$ және $\partial w / \partial r = 0$ ($r = a$) шекаралық шарттарынан меншікті мәндер теңдеуі шығады:

$$\lambda_o J_1(\lambda_o) I_0(\lambda_e) + \lambda_e I_1(\lambda_e) J_0(\lambda_o) = 0 \quad (2)$$

$$\lambda_e^2 = \frac{k^2 + \sqrt{k^4 + 4\Omega^2}}{2}, \quad \lambda_o^2 = \frac{-k^2 + \sqrt{k^4 + 4\Omega^2}}{2}, \quad (3)$$

$$k^2 = \frac{N_r a^2}{D}, \quad \Omega = \omega a^2 \sqrt{\frac{\rho_s h}{D}} \quad (4)$$

мұнда J , I – кәдімгі және модификацияланған Бессель функциялары. $N_r = 0$ болғанда (2) теңдеудің бірінші түбірі $\Omega_0 = 10,215826$ және меншікті жиілік:

$$f_0 = \frac{10,215826}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E h^2}{12\rho_s(1 - \nu^2)}} \quad (4)$$

Созу басым болатын шекте $\Omega/k \rightarrow 2,4048$. Бұл тексерулер нақты a , h , N_r мәндері болмағанда сенсордың жиілігін анықтамайды. Таңдалған кристаллографиялық бағдар мен резисторлардың орналасуы үшін [12]:

$$\frac{U_{\text{out}}}{U_{AB}} = \frac{1}{2} \pi_{44}(N, T)(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}),$$

$$\pi_{44}(N, T) = P(N, T) \pi_{44}(N_0, T_0), \quad \alpha_\pi = \frac{\partial \ln \pi_{44}}{\partial T} \quad (5)$$

мұнда U_{out} – көпірдің шығыс кернеуі; U_{AB} – көпірдің қорек кернеуі; $\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}$ – радиалды және тангенциалды механикалық кернеулер; $P(N, T)$ – легирлеу деңгейі мен температураға тәуелді көбейткіш. $\alpha_\pi = -0,27 \text{ \%}/\text{K}$ – есептік кіріс, өлшенген легирлеу сипаттамасы емес. Мембрана екінші ретті буынмен сипатталады, ал жолақ B АЖС-тың ± 1 дБ дәлізінен бірінші шығу жиілігі ретінде анықталады:

$$W_3(j\omega) = \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + 2j\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right]^{-1}, \quad (6)$$

$$B = \inf\{f > 0: |20\lg|W(j2\pi f)|| > 1\}$$

мұнда W – жеке буынның немесе толық каскадтың берілісі; шек 1 дБ-ге тең. Меншікті жиілік f_n , максимум жиілігі f_{peak} және жолақ B бір-бірінен ажыратылады. Жеке буында $\zeta < 1/\sqrt{2}$ үшін $f_{\text{peak}} = f_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$; каскадтың максимумы әр жағдайда қайта есептеледі.

Акустикалық модель

Түтіктегі тұтқырлық және жылулық шығындар [4, 5] бойынша сипатталады:

$$\alpha = j^{3/2} R \sqrt{\frac{\rho_0 \omega}{\mu}}, \quad n = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{J_2(\alpha \sqrt{\text{Pr}})}{J_0(\alpha \sqrt{\text{Pr}})} \right]^{-1} \quad (7)$$

$$\Gamma = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\gamma}{n}} \sqrt{\frac{J_0(\alpha)}{J_2(\alpha)}}, \quad Z_c = \frac{\rho_0 c}{\pi R^2} \sqrt{\frac{n}{\gamma}} \sqrt{-\frac{J_0(\alpha)}{J_2(\alpha)}} \quad (8)$$

мұнда R – түтік радиусы; $\rho_0, \mu, \gamma, \text{Pr}$ – ауаның тығыздығы, динамикалық тұтқырлығы, адиабата көрсеткіші және Прандтль саны; c – дыбыс жылдамдығы; n – политропа көрсеткіші. Түбір тармақтары пассивтілік шартымен үйлеседі: шығынсыз шекте $\Gamma \rightarrow j\omega/c$, $Z_c \rightarrow \rho_0 c / (\pi R^2)$. Толқындық кедергі Z_c қысымның көлемдік шығынға қатынасы ретінде анықталады. Ұзындығы L түтіктің ауысу матрицасы, қуыстың кедергісі және тізбектің берілісі:

$$\mathbf{T}(L) = \begin{pmatrix} \cosh \Gamma L & Z_c \sinh \Gamma L \\ Z_c^{-1} \sinh \Gamma L & \cosh \Gamma L \end{pmatrix}, \quad Z_v = \frac{\rho_0 c^2}{j\omega V} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} p_{\text{in}} \\ q_{\text{in}} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} p_m \\ q_m \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \mathbf{T}_{\text{rad}} \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2, \quad (10)$$

$$\mathbf{T}_{\text{rad}} = \begin{pmatrix} 1 & Z_{\text{rad}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad W_{\text{ac}} = \frac{p_m}{p_{\text{in}}} = \frac{Z_v}{A_{11} Z_v + A_{12}}$$

мұнда $\mathbf{T}_1 = \mathbf{T}(L)$ – зонд; $\mathbf{T}_2 = \mathbf{T}(l_{\text{eff}})$ – мойын; $l_{\text{eff}} = l + 1,7R$ – мойынның тиімді ұзындығы. Радиацияның активті кедергісі $Z_{\text{rad}} = \rho_0 c (\omega R/c)^2 / (2\pi R^2)$ деп қабылданды; шеттік түзету тиімді ұзындыққа енгізілген, реактивті радиация бөлек қосылмайды.

Қуыс адиабаталық деп алынды, яғни түтік шығындары қуыстағы жылу алмасуды қамтымайды. $W = W_{\text{ac}} W_3$ біржақты байланысында мембрананың көлемдік шығыны газдың сығылуынан туындайтын шығынмен салыстырғанда елеусіз деп есептелді; бұл [8] жұмысындағы мембрана әсерін нөлге тең қабылдауға сәйкес келеді. Кері жүктеме елеулі болса, мембрананың өлшенген кедергісі Z_m қажет және (10) өрнегі $Z_{\text{eff}} = (Z_v^{-1} + Z_m^{-1})^{-1}$ арқылы қайта есептеледі. «Толық каскад» термині тек көрсетілген буындарды білдіреді.

Радиациясыз бір түтік пен соңғы көлем үшін:

$$W_1 = \left[\cosh \Gamma L + \frac{V_v}{\pi R^2 L} \cdot \frac{n}{\gamma} \Gamma L \sinh \Gamma L \right]^{-1} \quad (11)$$

мұнда V_v – түтіктің соңындағы көлем. Салыстыру үшін жинақталған (Гельмгольц) модель қолданылды:

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi d^2/4}{V l_{\text{eff}}}}, \quad W_2 = \left[1 - \left(\frac{f}{f_H} \right)^2 + 2j\zeta_H \frac{f}{f_H} \right]^{-1} \quad (12)$$

мұнда d – мойын диаметрі; ζ_H – демпфирлеу коэффициенті. Бұл модель мойын көлемі қуыс көлемінен едәуір аз және акустикалық өлшемдер толқын ұзындығынан қысқа болғанда қолданылады. ζ_H – тәуелсіз сценарий параметрі; оны B мәніне сәйкестендіру эксперименттік идентификация емес. Әр сценарийде 30 кГц-ке дейін шекараның ертерек бұзылмағаны тексерілді.

Температуралық өтемдеу және өздігінен қызу

Тұрақты E_P , x және $\beta = dU_{EB}/dT < 0$ үшін:

$$U_{AB} = E_P - xU_{EB}, \quad \frac{1}{S} \frac{dS}{dT} = \alpha_\pi + \gamma_x, \quad \gamma_x = \frac{x|\beta|}{E_P - xU_{EB}} \quad (13)$$

мұнда E_P – қорек кернеуі; U_{EB} – транзистордың эмиттер–база кернеуі; x – резистивті белгіштің коэффициенті; $S \propto \pi 44 U_{AB}$ – сезімталдық. Транзистор мен сенсордың температуралары бірдей өзгереді деп алынды. $\beta \approx -(1,5 \dots 2)$ мВ/К – [13, 61-6.] бойынша типтік баға, нақты транзистордың сертификатталған мәні емес. Сезімталдықтың температура бойынша бірінші туындысының нөлге тең болу шарты:

$$x^* = \frac{|\alpha_\pi| E_P}{|\beta| + |\alpha_\pi| U_{EB}}, \quad U_{AB}^* = \frac{E_P |\beta|}{|\beta| + |\alpha_\pi| U_{EB}} \quad (14)$$

$x = 1 - R_8/R_9$ топологиясында ($R_8, R_9 > 0$) оң өтемдеу үшін $0 \leq x < 1$, ал $x = 1$ – идеал шек. $x > 1$ басқа схеманы, кернеу қорын және жұмыс режимін тексеруді қажет етеді. (14) шарты толық температура диапазонындағы нөлдік дрейфті дәлелдемейді.

Кристалл (T_j), корпус (T_c) және орта (T_a) температуралары үшін орныққан бір ағынды жылулық модель:

$$P = \frac{U^2}{R_k}, \quad T_j - T_a = P(R_{th,jc} + R_{th,ca}), \quad T_c - T_a = P R_{th,ca} \quad (15)$$

мұнда R_k – көпір кедергісі; $R_{th,jc}$ және $R_{th,ca}$ – кристалл–корпус және корпус–орта жылулық кедергілері. Екі жұмыс нүктесінде $R_{th} = R_{th,jc} + R_{th,ca}$ болса, өздігінен қызулардың қатынасы:

$$\frac{\Delta T_{sh,1}}{\Delta T_{sh,2}} = \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 \frac{R_{k,2}}{R_{k,1}} \cdot \frac{R_{th,1}}{R_{th,2}} \quad (16)$$

Терморезистор кедергілерінің қатынасы бойынша қызуды анықтау үшін тұрақты U , R_{th} және $R_k \propto R_t$ шарттары бөлек негізделуі тиіс. Жұпталған T , R өлшеу хаттамасы болмағандықтан, терморезистордың регрессиялық сипаттамасы мен қызудың абсолют мәні бұл жұмыста сенсордың нәтижесі ретінде берілмейді.

Белгісіздік және есептеулерді верификациялау

Түзетілген салыстырмалы нәтиже $y = \sum x_i$ (дБ) аддитивті модельмен сипатталады, сезімталдық коэффициенттері бірге тең [14, 15]:

$$u_c^2 = \sum_i u_i^2 + 2 \sum_{i < j} r_{ij} u_i u_j, \quad U(k) = k u_c, \quad (17)$$

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\sum_i u_i^4 / v_i}$$

мұнда u_i – құрамдастардың стандартты белгісіздіктері; r_{ij} – корреляция коэффициенттері; k – қамту коэффициенті; v_i – еркіндік дәрежелері; v_{eff} өрнегі тек тәуелсіз құрамдастар үшін қолданылады. Тікбұрышты таралу үшін $u = \Delta/\sqrt{3}$, мұнда Δ – шектің жарты ені. 95 % аралықтың жарты ені $q_{0,95}$ шамасы $P(|y| \leq q_{0,95}) = 0,95$ шартынан табылады және $U(k=2)$ шамасына міндетті түрде тең емес. Базалық кірістер тәуелсіз, орта мәні нөлге тең, таралу параметрлері бекітілген деп алынды. Монте-Карло әдісімен [15] әр сценарийге бес тәуелсіз тізбек, әрқайсысында $2 \cdot 10^6$ іске асыру орындалды (PCG64 генераторы,

SeedSequence(20260921).spawn(10)). Квантильдер детерминделген сандық интегралдаумен тексерілді.

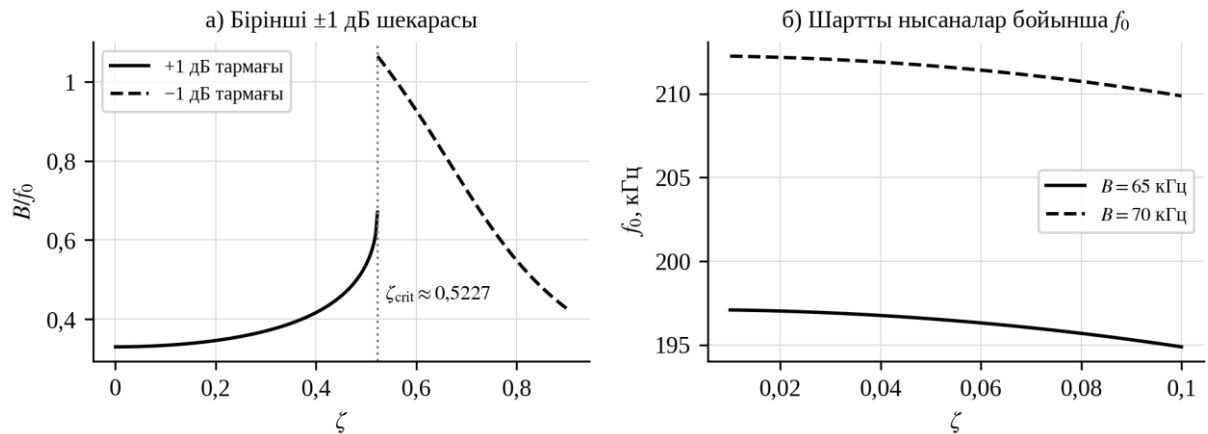
Есептеулер қос дәлдікпен орындалды: B шекарасы $10^{-5} \dots 5 \cdot 10^5$ Гц торында Брент әдісімен, шыңдар локалды оңтайландырумен анықталды. 1001/4001/16001 түйінді торлар, $10^{-4}/10^{-8}/10^{-10}$ Гц рұқсаттар, полином түбірлері, Бессель функцияларының масштабталған түрі және матрицалық көбейтінді салыстырылды (3-кесте).

Нәтижелер және оларды талқылау.

Бір жолақ шекарасының ақпараттылығы

$\zeta = 0,01; 0,05; 0,10$ үшін $B/f_0 = 0,32981; 0,33070; 0,33354$, яғни демпфирлеу он есе өзгергенде бұл қатынас небәрі $\approx 1,13$ %-ға өзгереді. Демек бір B мәні екі параметрді бірге анықтамайды. $B = 70$ кГц нысанасы $f_0 \approx 209,9 \dots 212,2$ кГц, ал 65 кГц нысанасы 194,9...197,1 кГц береді. $f_0 \geq 195$ кГц бағасы нақты ± 1 дБ жолақ пен қабылданған демпфирлеу аралығы расталғанда ғана жарамды; ол [9] жұмысындағы әдіс дәлдігінен тікелей шықпайды.

$\zeta_{\text{crit}} \approx 0,522728$ кезінде АЖС $+1$ дБ деңгейіне тек жанасады, сондықтан шекара бұзылмайды: B/f_0 сол жақ шектегі $\approx 0,67343$ мәнінен -1 дБ тармағындағы $\approx 1,06542$ мәніне секірімелі түрде ауысады (2-сурет). Бекітілген $f_0 = 211,6$ кГц, $\zeta = 0,05$ үшін $B = 69,976$ кГц; дәл 70 кГц алу үшін $f_0 = 211,672$ кГц қажет.



2 сурет – Оқшауланған екінші ретті буын: а – бірінші ± 1 дБ шекарасы және тармақтың ауысуы; б – $B = 65$ және 70 кГц шартты нысаналары үшін f_0 бағалары. Қысықтар өлшеу нәтижелері немесе сенімділік аралықтары емес

$f_0 \geq 195$ кГц және $\zeta \in [0,01; 0,10]$ болғанда мембрананың 30 кГц-тегі күшейтуі $+0,2081$ дБ-ден аспайды. Бұл бірдей мембраналар жорамалында конструкциялар арасындағы айырманы акустикалық трактіден іздеуге негіз береді, бірақ нақты себептілікті дәлелдемейді.

Қуыс пен зонд

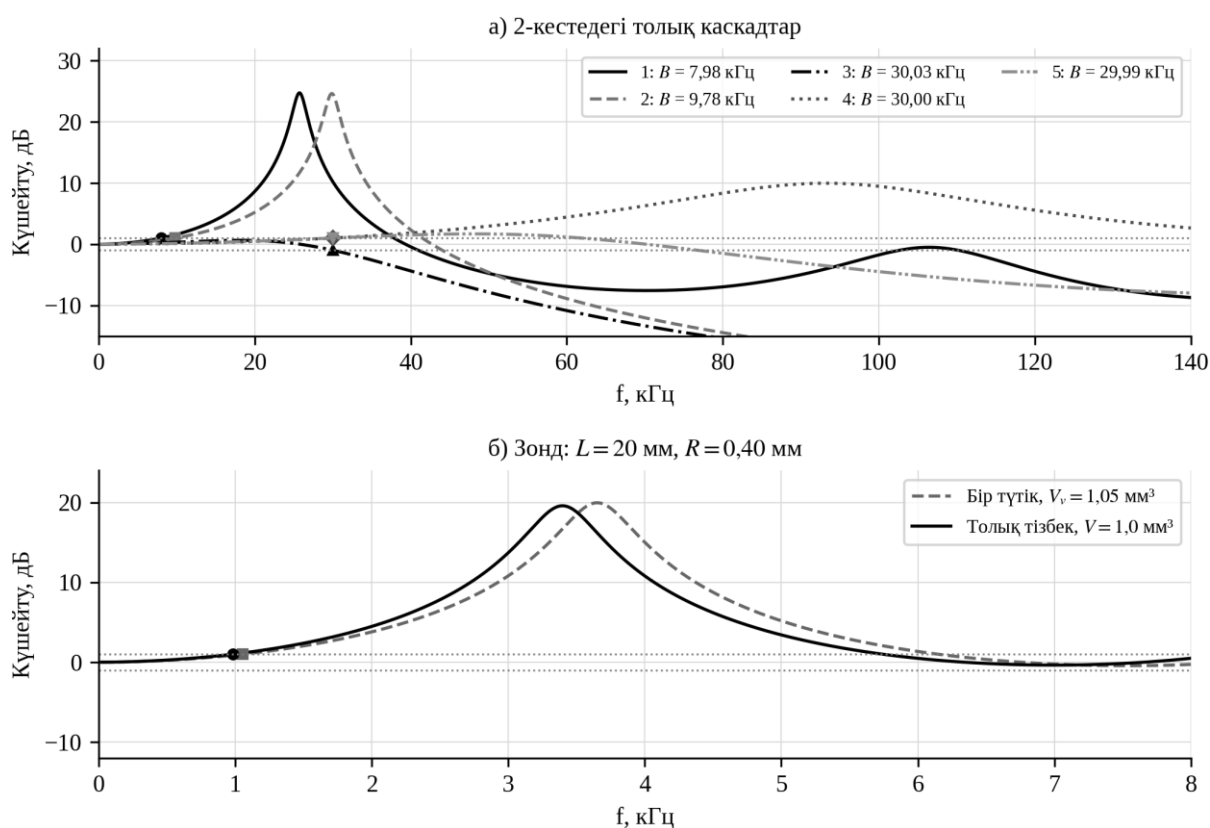
Жинақталған модель бойынша геометриялық баға $f_H = 29,878$ кГц; f_H шамасының V , d , l бойынша логарифмдік сезімталдықтары $-0,500; +0,798; -0,298$. Мойын көлемі $0,503$ мм³, яғни қуыс көлемімен салыстырмалы болғандықтан, таралған әсерлер елеулі болуы мүмкін. Радиациясы бар таралған акустикалық модельдің шыңы 25,727 кГц-те $+24,596$ дБ; мембрана қосылған толық каскадтардың нәтижелері 2-кестеде берілген. Жиіліктің 29,9-дан 25,7 кГц-ке төмендеуі ≈ 14 %-ды құрайды (кері бағытта салыстырғанда 29,9 кГц мәні $\approx 16,2$ %-ға жоғары).

$B \approx 30$ кГц беретін сценарийлердің шыңдары әртүрлі (3-сурет). 4- және 5-жолдардағы $+9,955$ және $+1,678$ дБ толық каскадқа қатысты, ал жеке W_2 буынының шыңдары $+8,136$ және $+1,249$ дБ. 3-жолдағы $f_H = 29,9$ кГц параметрі 18,132 кГц-тегі максимум жиілігіне тең емес.

2 кесте – Бірдей мембрана буынын қамтитын толық каскадтардың нәтижелері

№ және акустикалық модель	f_H , кГц	ζ_H	B , кГц	Бірінші акустикалық максимум $f_{\text{реак}}$, кГц	Шың, дБ
1. Таралған мойын және адиабаталық қуыс	—	—	7,981	25,728	24,725
2. Жинақталған сценарий	29,9	0,03	9,784	29,874	24,615
3. Жинақталған сценарий	29,9	0,57	30,029	18,132	0,630
4. Жинақталған сценарий	95,2	0,20	30,005	93,208	9,955
5. Жинақталған сценарий	63,6	0,50	29,993	48,081	1,678

Ескертпе – авторлардың есептеулері; барлық жолдарда мембрана буыны $f_0 = 211,6$ кГц, $\zeta = 0,05$.

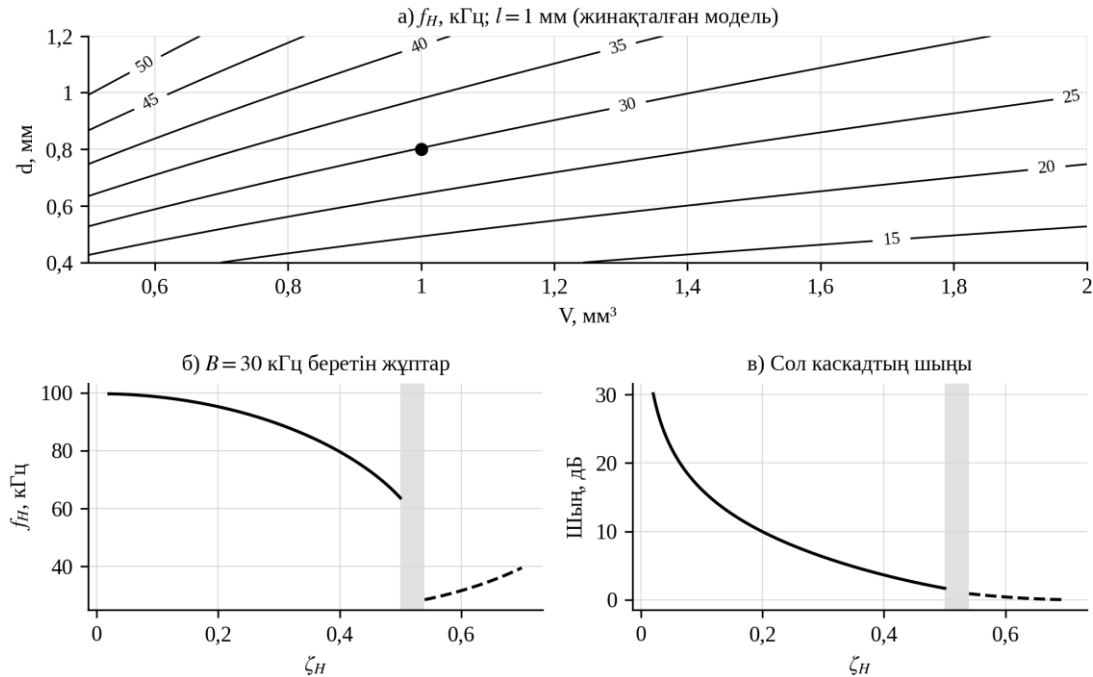


3 сурет – а – 2-кестедегі толық каскадтардың АЖС (қисық нөмірлері кесте жолдарына сәйкес); б – бір түтік пен соңғы көлем және зонд–мойын–қуыс толық тізбегі. Көлденең пунктир сызықтар ± 1 дБ шектерін, белгілер B мәндерін көрсетеді

$B = 30$ кГц шартын қанағаттандыратын, бірінші шекарасы тексерілген 180 жұп үшін $\zeta_H = 0,54$ кезінде $f_H = 28,438$ кГц, шың $+0,895$ дБ; $\zeta_H = 0,02$ кезінде $f_H = 99,645$ кГц, шың $+30,121$ дБ (4-сурет). Демек ζ_H мен шың биіктігіне барлық жағдайға ортақ шектеу қоюға болмайды. $0,50 < \zeta_H < 0,54$ аралығы есептелмеген, сондықтан ол үйлесімсіз деп тұжырымдалмайды.

Бір түтік үшін ($L = 20$ мм, $R = 0,40$ мм, $V_v = 1,05$ мм³) шың 3,651 кГц-те $+19,955$ дБ, $B = 1,056$ кГц. Мойын, $V = 1,0$ мм³ қуыс, радиация және W_3 қосылған толық тізбек үшін шың 3,397 кГц-те $+19,579$ дБ, $B = 0,981$ кГц; $V = 1,05$ мм³ болғанда $B = 0,978$ кГц. Айырма тізбектің геометриясы мен құрамына байланысты; бірдей бір түтік үшін (11) формула мен

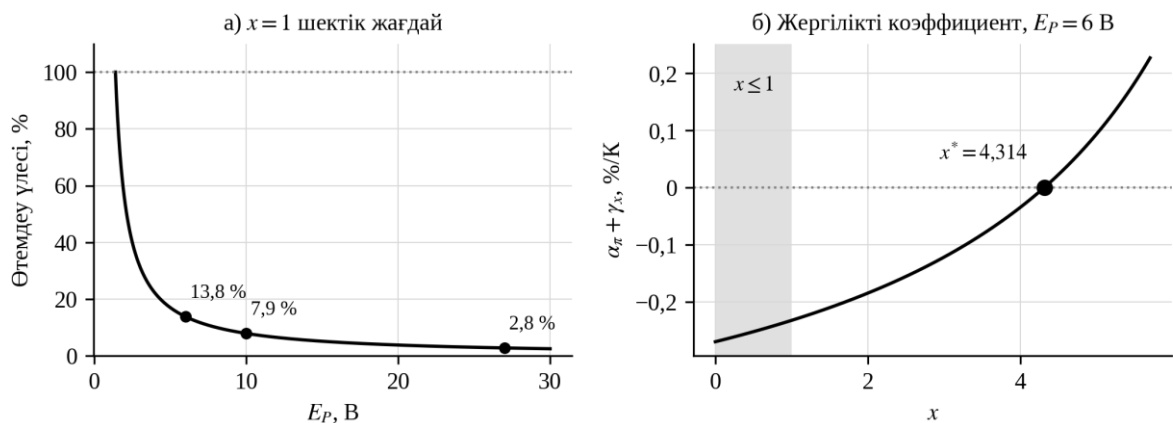
матрицалық есеп сәйкес келеді. Сондықтан зонд ұзындығы жалғыз өзі жолақты анықтамайды. ≈ 8 және 30 кГц жолақтарының айырмасы нақты датчикте тек қосымша демпфер бар екенін дәлелдемейді.



4 сурет – а – $l = 1,0$ мм кезіндегі жинақталған $f_H(V, d)$ номограммасы, нүкте 1-кесте геометриясына сәйкес; б – $B = 30$ кГц беретін (f_H, ζ_H) жұптары; в – сол толық каскадтың акустикалық шыңы. Бір-бірінен ажыраған тармақтар жалғанбайды; сұр аймақ $(0,50 < \zeta_H < 0,54)$ есептелмеген және интерполяцияланбаған

Температуралық өтемдеу және есептеулерді тексеру

$E_P = 6$ В және $x \leq 1$ болғанда жергілікті өтемдеу қажетті мәnnің 13,846 %-ын құрайды; 10 және 27 В үшін сәйкесінше 7,922 және 2,811 % (5-сурет). $x^* = 1$ шегі $E_P = 1,3907$ В-қа сәйкес келеді, бірақ бұл кезде транзистордың жұмыс режимі бөлек тексерілуі тиіс. 6 В кезінде $x^* = 4,314$, $U_{AB}^* = 3,196$ В. Бірінші туынды нөлге тең болғанымен, жоғары ретті әсерлер мен жылулық сәйкессіздік сақталады.



5 сурет – Жергілікті өтемдеу мысалы: а – $x = 1$ шегіндегі өтемдеу үлесінің E_P -ға тәуелділігі; б – $E_P = 6$ В кезіндегі қалдық жергілікті коэффициент $\alpha_\pi + \gamma_x$ және $x^* = 4,314$ нүктесі. Сұр аймақ $x \leq 1$ шартын көрсетеді; $x > 1$ аймағы басқа топологияны талап етеді

Есептеу модельдерін тексеру нәтижелері 3-кестеде жинақталған. Келтірілген өте кіші айырмалар есептеу процедурасына қатысты және бұйым сипаттамаларының белгісіздігі болып табылмайды.

3 кесте – Есептеу модельдерін тексеру нәтижелері

Тексеру	Нәтиже	Критерий немесе қолданылу шегі
Пластина шегі, $k = 0$	$\Omega_0 = 10,2158262299$	[5; 15], [8; 12], [10; 11] аралықтарында түбір; бисекциямен айырма $\approx 10^{-12}$
Созу басым шек	$\Omega/k = 2,4171$ ($k = 200$)	Асимптоталық 2,4048 мәнінен $\approx 0,51$ % айырма
Акустикалық шығынсыз шек	$\Gamma \rightarrow j\omega/c$; $Z_c \rightarrow \rho_0 c / (\pi R^2)$	$\exp(j\omega t)$ және көлемдік шығын келісімі
Бірдей радиусты түтіктер	$T(L_1)T(L_2) = T(L_1 + L_2)$; берілістердің ең үлкен салыстырмалы айырмасы $6,8 \cdot 10^{-14}$	0,01 Гц – 1 МГц есептік торы
Бессель функцияларын масштабтау	Берілістердің ең үлкен салыстырмалы айырмасы $1,4 \cdot 10^{-13}$	Сол тор, толық зонд тізбегі
Бірінші жолақ шекарасы	Тор мен рұқсатты өзгерткенде $\Delta B < 5 \cdot 10^{-6}$ Гц	Үш сценарий, 1001–16001 түйін
Екі буынды каскад шыңы	Полином туындысы мен тікелей кешенді беріліс келіседі	2-кестенің 2–5-жолдары; шың жеке буыннан көшірілмейді
95 % квантиль	2,213966 және 0,949607 дБ	Детерминделген интегралдау; Монте-Карло нәтижесін бақылау
<i>Ескертпе – авторлардың есептеулері.</i>		

Белгісіздік сценарийлері

А сценарийі паспорттық ± 2 дБ шегіне тікбұрышты таралу жорамалын қосады; өндіруші бұл ықтималдық заңын бекітпеген. В сценарийі түзетілген эталон қалдығына гипотетикалық $U_{\text{ref}} = 0,30$ дБ ($k = 2$) мәнін қабылдайды. Екі бюджет те қол жеткізілген стенд дәлдігі емес (4-кесте, 6-сурет).

4 кесте – Аддитивті дБ моделі үшін шартты белгісіздік бюджеті

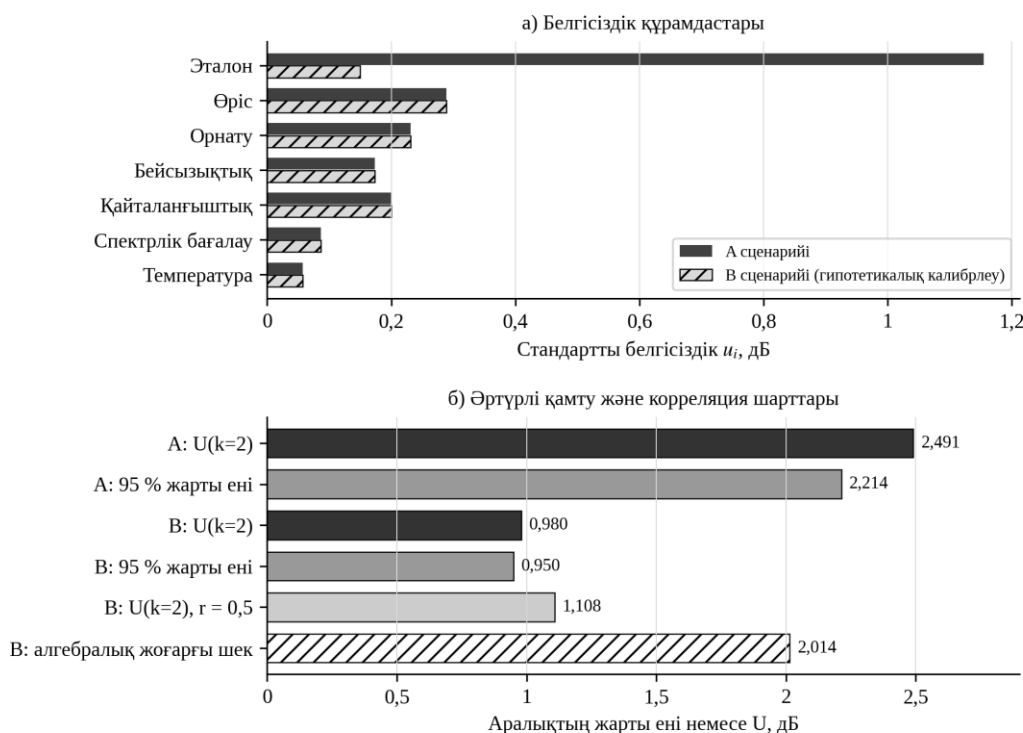
Құрамдас	Қабылданған кіріс және таралу	А сценарийі, u_i , дБ	В сценарийі, u_i , дБ	Негізі
Эталонның жиіліктік жауабы	А: $\pm 2,00$, тікбұрышты; В: қалыпты, $\sigma = 0,15$	1,1547	0,1500	[11] шегі + таралу жорамалы; В – гипотетикалық калибрлеу
Акустикалық өріс	$\pm 0,50$, тікбұрышты	0,2887	0,2887	Стенд деректерімен расталмаған сценарий
Орнату	$\pm 0,40$, тікбұрышты	0,2309	0,2309	Сценарий
Тракт бейсызықтығы	$\pm 0,30$, тікбұрышты	0,1732	0,1732	Сценарий; тракт паспорты ұсынылмаған
Қайталанғыштық	қалыпты, $\sigma = 0,20$	0,2000	0,2000	Нәтиженің стандартты белгісіздігі ретінде жорамал
Спектрлік бағалау және кванттау	$\pm 0,15$, тікбұрышты	0,0866	0,0866	Сценарий
Температуралық әсер	$\pm 0,10$, тікбұрышты	0,0577	0,0577	[11]: $-0,01$ дБ/°C және ± 10 °C сценарийі

Құрамдас	Қабылданған кіріс және таралу	А сценарийі, u_i , дБ	В сценарийі, u_i , дБ	Негізі
u_c	тәуелсіз құрамдастар	1,2453	0,4899	(17)
$U(k=2)$	кеңейтілген белгісіздік	2,4906	0,9798	$2u_c$
$q_{0,95}$	95 % симметриялы аралықтың жарты ені	2,2140	0,9496	Таралуларды тарату [15]
Ескертпе – авторлардың есептеулері.				

$U(k=2)$ шектерінің нақты қамтуы А және В үшін 98,253 % және 95,746 %. Сондықтан оларды 95 % аралықтың жарты енімен бірдей « U_{95} » деп белгілеуге болмайды. Монте-Карло квантильдерінің тізбектер арасындағы стандартты ауытқуы 0,00117 және 0,00069 дБ; бұл өлшеу белгісіздігі емес, есептеудің сандық шашырауы.

В бюджетінде $u_A = s/\sqrt{n} = 0,20$ дБ бекітіліп, В типті бағалауларға $v_i = \infty$ берілсе, $n = 2, 4, 10$ үшін $v_{\text{eff}} = 36, 108, 324$. $n = 2$ кезінде жуық $U_{95} = 0,994$ дБ, яғни бұл модельде 1 дБ шегі үшін $n \geq 3$ шарты міндетті емес. Бұл бір деректер жиынында n -ді арттыру тәжірибесі емес. В типті бағалаулардың сенімділігін төмендету нәтижені өзгертеді: $n = 2$ және басқа В типті құрамдастар үшін $v = 2$ болғанда $v_{\text{ref}} = \infty$ үшін $U_{95} = 1,124$ дБ, ал $v_{\text{ref}} = 2$ үшін 1,131 дБ. Тәуелсіз құрамдастарға арналған Уэлч–Саттертуэйт жуықтауы алдын ала бекітілген таралулар моделімен бірдей емес.

Өріс пен орнату құрамдастары арасындағы корреляция $r = 0,3; 0,5; 1$ болса, В үшін $U(k=2) = 1,058; 1,108; 1,222$ дБ. Барлық В типті құрамдастар толық корреляцияланған деп алынғанда 2,014 дБ – алгебралық жоғарғы шек; әртүрлі таралуларға бір мезгілде Пирсонның $r = 1$ коэффициентін беру іс жүзінде жүзеге асатын бірлескен модель емес.



6 сурет – а – А және В сценарийлерінің стандартты белгісіздік құрамдастары; б – $U(k=2)$, 95 % аралықтың жарты ені, өріс–орнату корреляциясының әсері және алгебралық жоғарғы баға. В сценарийіндегі эталон калибрлеуі гипотетикалық

Қолданылу шектері және валидацияға қойылатын талаптар

Есеп 20 °C маңындағы ауаға қатысты; жоғары температурада, агрессивті ортада немесе дірілде жұмысқа қабілеттілік бұл жұмыста расталмайды. Қуыстағы жылу алмасу, мембрананың кері жүктемесі және нақты электроника бағаланбаған. Эксперименттік валидация үшін нақты геометрия, қорғаныш тор, жылулық шекаралар, нормаланған кешенді АЖС, эталон түзетулері және орта жағдайлары қажет. Өлшеу диапазоны күтілетін резонансты қамтуы немесе оған дейінгі идентификация негізделуі тиіс; 150 кГц жоғарғы шегі ≥ 195 кГц резонансты бақылауға жеткіліксіз.

Температуралық тексеру үшін жұпталған T , R өлшемдері, қыздыру–салқындату циклдері, ток, корек кернеуі, тұрақтану уақыты және кристалл мен корпус температуралары қажет. Жеке өлшемнің шашырауы орта мәннің белгісіздігінен ажыратылуы, ал қайталау саны мақсатты белгісіздікке сай таңдалуы тиіс.

Қорытынды.

1. Бір ± 1 дБ жолақ шекарасы меншікті жиілік f_0 пен демпфирлеу ζ -ны бірге анықтамайды: ζ он есе өзгергенде B/f_0 небәрі $\approx 1,13$ %-ға өзгереді. $f_0 \geq 195$ кГц бағасы тек расталған $B \geq 65$ кГц және қабылданған демпфирлеу аралығы жағдайында жарамды.

2. Қабылданған мойын–қуыс геометриясы үшін толық каскад 25,728 кГц-те шың және $B = 7,981$ кГц береді, ал 20 мм зонды бар толық тізбектің жолағы $B = 0,981$ кГц. Бұл нақты құрылғының расталған сипаттамалары емес, модель жорамалдарының салдары.

3. $E_p = 6$ В, $x \leq 1$ топологиясы жергілікті өтемдеудің 13,846 %-ын ғана береді; $x^* = 4,314$ мәні тек бірінші туындыны нөлге келтіреді және басқа схеманы талап етеді.

4. Шартты бюджеттер үшін $U(k=2) = 2,491$ және 0,980 дБ, ал 95 % аралықтың жарты ендері 2,214 және 0,950 дБ; бұл шамаларды бір-бірімен алмастыруға болмайды. Нақты сенсордың ± 1 дБ дәлдігі бұл жұмыста мәлімделмейді.

5. Кейінгі зерттеудің бағыты – ұсынылған талаптарға сай нақты геометрия бойынша кешенді АЖС-ты, жұпталған T , R деректерін және эталонның жеке калибрлеуін алу, содан кейін модельдерді тәуелсіз эксперименттік валидациялау.

Қаржыландыру. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (2025–2027 жж., грант № AP26196431).

Пайдаланылған дереккөздер тізімі

1. Han, X., Huang, M., Wu, Z., Gao, Y., Xia, Y., Yang, P., Fan, S., Lu, X., Yang, X., Liang, L., Su, W., Wang, L., Cui, Z., Zhao, Y., Li, Z., Zhao, L., & Jiang, Z. (2023). Advances in high-performance MEMS pressure sensors: Design, fabrication, and packaging. *Microsystems & Nanoengineering*, 9, Article 156. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00620-1>

2. Wu, C., Fang, X., Kang, Q., Fang, Z., Wu, J., He, H., Zhang, D., Zhao, L., Tian, B., Maeda, R., & Jiang, Z. (2023). Exploring the nonlinear piezoresistive effect of 4H-SiC and developing MEMS pressure sensors for extreme environments. *Microsystems & Nanoengineering*, 9, Article 41. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00496-1>

3. Basov, M. (2020). High-sensitivity MEMS pressure sensor utilizing bipolar junction transistor with temperature compensation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 303, Article 111705. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111705>

4. Kutin, J., & Svete, A. (2018). On the theory of the frequency response of gas and liquid pressure measurement systems with connecting tubes. *Measurement Science and Technology*, 29(12), Article 125108. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aae884>

5. Bergh, H., & Tjeldeman, H. (1965). *Theoretical and experimental results for the dynamic response of pressure measuring systems* (Report NLR-TR F.238). National Aero- and Astronautical Research Institute (NLR).

6. Гимадиев, А. Г., Быстров, Н. Д., & Дягилева, Е. С. (2018). Анализ схем коррекции динамических характеристик акустических зондов для измерения пульсаций давления в газотурбинных двигателях. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 17(3), 56–67. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-3-56-67>
7. Hurst, A. M., Olsen, T. R., Goodman, S., VanDeWeert, J., & Shang, T. (2014). An experimental frequency response characterization of MEMS piezoresistive pressure transducers. In *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014* (Vol. 6, Paper GT2014-27159, V006T06A031). ASME. <https://doi.org/10.1115/GT2014-27159>
8. Farnan, E. L., & Juliano, T. J. (2025). Dynamic response of line-cavity pressure-measurement systems. *Measurement Science and Technology*, 36(8), Article 085301. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/adebf4>
9. Михайлов, П. Г., Уалиев, Ж. Р., Кабдолдина, А. О., Пасхин, И. Н., & Светлов, А. В. (2025). Методы и средства контроля метрологических характеристик преобразователей физических величин. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*, (4), 77–87. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2025-4-9>
10. American Society of Mechanical Engineers. (2009). *Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer* (ASME V&V 20-2009, reaffirmed 2021).
11. Brüel & Kjær. (n.d.). *Condenser microphone cartridges* (Product data BP 0100). <https://www.bksv.com/media/doc/bp0100.pdf>
12. Kanda, Y. (1982). A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 29(1), 64–70. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1982.20659>
13. Ломтев, Е. А., Михайлов, П. Г., Аналиева, А. У., & Сазонов, А. О. (2015). Многофункциональные датчики физических величин. Принципы построения, модели и конструкции. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*, 2(12), 57–65. https://imuk.pnzgu.ru/files/imuk.pnzgu.ru/imuk_2_12_.pdf
14. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* (JCGM 100:2008). <https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E>
15. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" — Propagation of distributions using a Monte Carlo method* (JCGM 101:2008). <https://doi.org/10.59161/JCGM101-2008>

References

1. Han, X., Huang, M., Wu, Z., Gao, Y., Xia, Y., Yang, P., Fan, S., Lu, X., Yang, X., Liang, L., Su, W., Wang, L., Cui, Z., Zhao, Y., Li, Z., Zhao, L., & Jiang, Z. (2023). Advances in high-performance MEMS pressure sensors: Design, fabrication, and packaging. *Microsystems & Nanoengineering*, 9, Article 156. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00620-1>
2. Wu, C., Fang, X., Kang, Q., Fang, Z., Wu, J., He, H., Zhang, D., Zhao, L., Tian, B., Maeda, R., & Jiang, Z. (2023). Exploring the nonlinear piezoresistive effect of 4H-SiC and developing MEMS pressure sensors for extreme environments. *Microsystems & Nanoengineering*, 9, Article 41. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00496-1>
3. Basov, M. (2020). High-sensitivity MEMS pressure sensor utilizing bipolar junction transistor with temperature compensation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 303, Article 111705. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111705>
4. Kutin, J., & Svete, A. (2018). On the theory of the frequency response of gas and liquid pressure measurement systems with connecting tubes. *Measurement Science and Technology*, 29(12), Article 125108. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aae884>

5. Bergh, H., & Tijdeman, H. (1965). *Theoretical and experimental results for the dynamic response of pressure measuring systems* (Report NLR-TR F.238). National Aero- and Astronautical Research Institute (NLR).
6. Gimadiev, A. G., Bystrov, N. D., & Dyagileva, E. S. (2018). Analiz skhem korrektsii dinamicheskikh kharakteristik akusticheskikh zondov dlya izmereniya pul'satsii davleniya v gazoturbinnnykh dvigatelyakh [Analysis of correction schemes for dynamic characteristics of acoustic probes for measuring pressure pulsations in gas turbine engines]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 17(3), 56–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-3-56-67>
7. Hurst, A. M., Olsen, T. R., Goodman, S., VanDeWeert, J., & Shang, T. (2014). An experimental frequency response characterization of MEMS piezoresistive pressure transducers. In *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014* (Vol. 6, Paper GT2014-27159, V006T06A031). ASME. <https://doi.org/10.1115/GT2014-27159>
8. Farnan, E. L., & Juliano, T. J. (2025). Dynamic response of line-cavity pressure-measurement systems. *Measurement Science and Technology*, 36(8), Article 085301. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/adebf4>
9. Mikhailov, P. G., Ualiev, Zh. R., Kabdoldina, A. O., Pashkin, I. N., & Svetlov, A. V. (2025). Metody i sredstva kontrolya metrologicheskikh kharakteristik preobrazovatelei fizicheskikh velichin [Methods and means of control of metrological characteristics of physical quantity converters]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*, (4), 77–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2025-4-9>
10. American Society of Mechanical Engineers. (2009). *Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer* (ASME V&V 20-2009, reaffirmed 2021).
11. Brüel & Kjær. (n.d.). *Condenser microphone cartridges* (Product data BP 0100). <https://www.bksv.com/media/doc/bp0100.pdf>
12. Kanda, Y. (1982). A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 29(1), 64–70. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1982.20659>
13. Lomtev, E. A., Mikhailov, P. G., Analieva, A. U., & Sazonov, A. O. (2015). Mnogofunktsional'nye datchiki fizicheskikh velichin. Printsipy postroeniya, modeli i konstruksii [Multifunctional sensors of physical quantities: Construction principles, models and designs]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*, 2(12), 57–65. https://imuk.pnzgu.ru/files/imuk.pnzgu.ru/imuk_2_12_.pdf
14. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* (JCGM 100:2008). <https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E>
15. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" — Propagation of distributions using a Monte Carlo method* (JCGM 101:2008). <https://doi.org/10.59161/JCGM101-2008>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. При измерении пульсаций давления в авиационной технике чувствительный элемент, соединительные каналы, полости корпуса и схема питания совместно влияют на результат. Разделение этих влияний необходимо при проектировании полупроводниковых сенсоров для экстремальных условий. Цель работы — при явно заданных допущениях рассчитать частотный отклик, локальную

температурную компенсацию и распространение неопределённости, а также установить ограничения идентификации параметров по доступным характеристикам. Используются уравнение тонкой пластины, динамические звенья второго порядка, матрицы передачи трубок с вязкими и тепловыми потерями и аддитивная модель неопределённости в децибелах. Расчёты проверены предельными переходами, независимыми численными выражениями и методом Монте-Карло. Показано, что одна граница полосы не определяет одновременно собственную частоту и демпфирование. Нижняя оценка собственной частоты около 195 кГц получается только при принятии расчётной полосы 65 кГц и интервала демпфирования 0,01–0,10. В сценарии с диаметром горловины 0,8 мм, длиной 1 мм и объёмом полости 1 мм³ полный каскад даёт акустический пик 25,728 кГц и полосу 7,981 кГц. При добавлении зонда длиной 20 мм и радиусом 0,40 мм полоса этой цепи составляет 0,981 кГц. Тепловые потери в полости и обратная акустическая нагрузка мембраны в данный расчёт не включены. Для принятых температурных коэффициентов и питания 6 В ограниченная топология обеспечивает 13,846 процента требуемой локальной компенсации; обнуление первой производной при другом коэффициенте не доказывает стабильность во всём диапазоне температур. Для двух условных бюджетов расширенная неопределённость с коэффициентом охвата два равна 2,491 и 0,980 дБ, а полуширина 95-процентного интервала охвата — 2,214 и 0,950 дБ. Результаты не представляются как новая экспериментальная валидация или подтверждённая точность конкретного прибора. Работа даёт основу для проверки модельных допущений и построения последующего измерительного протокола.

Ключевые слова: пьезорезистивный сенсор, частотный отклик, резонанс полости, акустический зонд, идентификация параметров, температурная компенсация, неопределённость измерений, численная верификация.

INVESTIGATION OF THE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR SENSORS DESIGNED TO OPERATE IN EXTREME CONDITIONS

Abstract. Pressure-pulsation measurements in aircraft testing depend on the sensing element, connecting passages, housing cavities and supply circuit. This study separates their effects on frequency response, local temperature compensation and uncertainty under explicit assumptions relevant to semiconductor sensors intended for extreme conditions. Thin-plate and second-order models, viscothermal tube transfer matrices and an additive decibel uncertainty model are checked through limiting cases, independent calculations and Monte Carlo propagation. A single bandwidth boundary cannot jointly identify natural frequency and damping. A lower frequency estimate near 195 kHz requires an assumed 65 kHz bandwidth and damping of 0.01–0.10. For a neck 0.8 mm in diameter and 1 mm long, with a 1 mm³ cavity, the complete cascade has a peak at 25.728 kHz and a bandwidth of 7.981 kHz. A 20 mm probe of radius 0.40 mm reduces the bandwidth to 0.981 kHz. Cavity thermal losses and diaphragm acoustic back-loading are neglected. With assumed temperature coefficients and a 6 V supply, the restricted topology provides 13.846 percent of the required local compensation; zeroing the first derivative does not establish stability across the temperature range. Two illustrative budgets give expanded uncertainties of 2.491 and 0.980 dB for a coverage factor of two, and 95 percent interval half-widths of 2.214 and 0.950 dB. The results are conditional computational examples, without new experimental validation or verified accuracy claims for a particular sensor. The work provides a basis for testing the model assumptions and for designing a subsequent measurement protocol.

Keywords: piezoresistive sensor, frequency response, cavity resonance, acoustic probe, parameter identification, temperature compensation, measurement uncertainty, numerical verification.

Авторлар туралы мәліметтер

Уалиев Ж. Р.	PhD, Сандық техника және технологиялар институтының зерттеуші-профессоры, Алматы қ., Қазақстан. E-mail: zh-u@mail.ru
Михайлов П. Г.	Техника ғылымдарының докторы, Қазақстан инновациялық және телекоммуникациялық университетінің профессоры, Орал қ., Қазақстан. E-mail: pit_mix@mail.ru
Ақжолова А. И.	Сандық техника және технологиялар институтының ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан. E-mail: asel_zhalyn@mail.ru.
Кабдолдина А. О.	PhD, Қ.И. Сәтбаев атындағы қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің профессоры, Алматы қ., Қазақстан. E-mail: kao_assem@mail.ru
Бектилезов А. Ю.	Ph.D., «Көлік инженериясы және логистика» мектебінің «Көлік» бағыты бойынша қауымдастырылған профессоры, «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, E-mail: a.bektilevov@satbayev.university

Сведения об авторах

Уалиев Ж. Р.	PhD, профессор-исследователь Института цифровой техники и технологий, г. Алматы, Казахстан. E-mail: zh-u@mail.ru
Михайлов П. Г.	Доктор технических наук, профессор Казахского университета инновационных и телекоммуникационных систем, г. Уральск, Казахстан. E-mail: pit_mix@mail.ru
Ақжолова А. И.	Институт цифровой техники и технологий. г. Алматы, Казахстан. E-mail: asel_zhalyn@mail.ru.
Кабдолдина А. О.	PhD, профессор Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан. E-mail: kao_assem@mail.ru
Бектилезов А. Ю.	Ph.D., ассоц. профессор направления «Транспорт» школы «Транспортная инженерия и логистика» НАО Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: a.bektilevov@satbayev.university

Information about the authors

Ualiyev Zh. R.	PhD, Research Professor, Institute of Digital Engineering and Technology, Almaty, Kazakhstan. E-mail: zh-u@mail.ru
Mikhailov P. G.	Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazakhstan University of Innovation and Telecommunication Systems, Uralsk, Kazakhstan. E-mail: pit_mix@mail.ru
Akzholova A. I.	Institute of Digital Engineering and Technology, Almaty, Kazakhstan. E-mail: asel_zhalyn@mail.ru.
Kabdoldina A. O.	PhD, Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan. E-mail: kao_assem@mail.ru
Bektilevov A. Yu.	Ph.D., Associate Professor of the direction "Transport" of the school "Transport Engineering and Logistics" of the Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, E-mail: a.bektilevov@satbayev.university



UDC 004.056.5:629.7.05

IRSTI 20.53.15, 20.53.21, 25.23.35

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_11

A. Sairanbekova¹, G. Bekmanova¹, V. Franzoni², Y. Tuleshov^{3*}

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Department of Mathematics and Computer Science, University of Perugia, Perugia, Italy

³Institute of Automation and Information Technologies, Department of Robotics and Technical Means of Automation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*E-mail: y.tuleshov@satbayev.university

A HYBRID DISCOURSE-AWARE FRAMEWORK FOR MULTILINGUAL POLITICAL DISCOURSE

Abstract. Political communication has migrated to social platforms, where opinions are expressed through short, code-switched, and rhetorically dense messages. Conventional sentiment analysis systems, tuned for product reviews, transfer poorly to this domain because political polarity is entangled with stance, irony, and discourse structure. This article surveys the principal families of sentiment analysis methods—lexicon-based, classical machine learning, deep neural, and transformer-based approaches—and introduces PoliSent, a hybrid discourse-aware architecture for political sentiment analysis on the Internet. PoliSent unifies three complementary signals: multilingual contextual embeddings produced by an XLM-RoBERTa encoder, a domain-specific political lexicon (PoliLex) with valence shifters and negation handling, and a graph-attention module operating over Universal Dependencies parses. A learned gating mechanism fuses these signals, and a multi-task objective jointly predicts sentiment, stance, and rhetorical tactic. We evaluate the framework on PoliWeb-CA, a newly annotated corpus of 18,500 Kazakh- and Russian-language political messages collected from microblogs, messaging channels, and news comment threads. PoliSent attains a macro-F1 of 0.904 and a Matthews correlation coefficient of 0.857, surpassing a fine-tuned KazRoBERTa baseline by 4.6 macro-F1 points and outperforming all lexicon, classical, and deep baselines by a wide margin ($p < 0.01$, paired bootstrap). Ablation studies confirm that each architectural component contributes measurably, with the dependency-graph attention and lexicon augmentation jointly responsible for a 5.8-point improvement over the contextual backbone. The results demonstrate that explicit linguistic structure remains valuable even in the era of large pretrained encoders, particularly for low-resource and morphologically rich political discourse.

Keywords: sentiment analysis, political discourse, opinion mining, natural language processing, transformer models, graph attention networks, stance detection, low-resource languages, Kazakh; multilingual NLP.

Introduction.

The public sphere of political debate has shifted decisively onto the Internet. Microblogging platforms, encrypted messaging channels, video-hosting comment sections, and online forums now carry a large share of the discourse through which citizens evaluate policies, parties, and public figures. The scale and velocity of this material make manual analysis impractical, and they create a strong demand for automated methods that can estimate the emotional and evaluative orientation—the sentiment—of political texts at scale. Reliable political sentiment analysis

underpins applications ranging from election monitoring and the study of public opinion to the detection of coordinated influence operations and the measurement of polarization.

Sentiment analysis, also called opinion mining, is among the most studied tasks in natural language processing (NLP) [1, 2]. Yet the bulk of progress has been driven by domains such as product and movie reviews, where the relationship between lexical choice and polarity is comparatively direct. Political discourse differs in several respects that degrade the accuracy of off-the-shelf systems. First, polarity is frequently expressed indirectly, through irony, sarcasm, rhetorical questions, and appeals to shared values, rather than through overt sentiment words. Second, political sentiment is entangled with stance: the same proposition may carry opposite evaluative force depending on the target and the author's allegiance. Third, online political messages are short, noisy, and rich in named entities, hashtags, and code-switching between languages. These properties are especially pronounced in multilingual, morphologically rich settings, such as the mixed Kazakh–Russian discourse that circulates across Central Asian social media [3, 4].

Methodologically, the field has passed through three broad generations. Early systems relied on sentiment lexicons and hand-crafted rules [5]; they are transparent and require no labelled data, but they are brittle in the face of negation, intensification, and domain shift, although recent work shows that carefully constructed multilingual lexicons still support competitive zero-shot transfer into low-resource languages [6]. The second generation applied classical supervised learning — naïve Bayes, logistic regression, and support vector machines over bag-of-words or term-frequency features [1, 5] — improving robustness at the cost of interpretability and feature-engineering effort. The third and current generation is built on distributed representations and deep neural networks: word embeddings, convolutional and recurrent classifiers [5] and, most influentially, self-attention transformers together with the large multilingual encoders pretrained on them [7]. Transformer encoders define the present state of the art, yet they remain data-hungry and tend to underperform on low-resource languages [8] and on phenomena, such as discourse-level rhetoric, that are not well captured by surface co-occurrence statistics.

This article makes two contributions. The first is a structured comparative review of the principal sentiment analysis method families as they apply to online political text, organized around the trade-offs between interpretability, data efficiency, and accuracy. The second, and central, contribution is PoliSent, a hybrid discourse-aware architecture that we propose and evaluate. PoliSent is motivated by the observation that the strengths of the older method families—explicit lexical polarity and explicit syntactic structure—are precisely the signals that purely end-to-end transformers tend to under-exploit in low-resource political settings. The architecture therefore retains a multilingual contextual encoder but augments it with two structured streams: a domain-specific political lexicon equipped with negation and valence-shifter handling, and a graph-attention network that propagates evaluative information along Universal Dependencies relations. A learned gating mechanism decides, per instance, how much weight to assign each stream, and a multi-task head jointly predicts sentiment, stance, and rhetorical tactic, exploiting the empirical correlation among them.

We summarize the novelty of the work as follows. (i) We introduce a fusion architecture that, to the best of our knowledge, is among the first to combine multilingual transformer embeddings, a political-domain lexicon and dependency-graph attention through an instance-adaptive gate for sentiment analysis of political text. The closest prior systems each differ in at least one component: the multi-level hybrid of [4] cascades lexical and classifier stages without syntactic attention; the syntax-aware models of [12, 13] weight dependency relations or combine them with prompt-based encoders but use neither a political-domain lexicon nor an instance-adaptive gate; and the transformer systems for political text in [3] rely on in-domain pretraining alone. (ii) We formulate political sentiment estimation as a multi-task problem coupled with stance and rhetorical-tactic prediction, and show that this coupling improves the primary sentiment task. (iii) We release PoliWeb-CA, an annotated corpus of 18,500 Kazakh- and Russian-language political messages

with three-way sentiment, stance, and tactic labels. (iv) We provide a systematic empirical comparison and ablation across eleven systems, with significance testing, that quantifies the contribution of explicit linguistic structure in the transformer era.

Lexicon-based and rule-based methods.

Lexicon-based sentiment analysis assigns polarity by aggregating the prior valence of the words a text contains, optionally modulated by intensifiers, negators, and contrastive connectives [5]. Carefully curated word lists combined with a small set of compositional rules can rival simple supervised models on short informal text, and multilingual lexicons have recently been shown to drive zero-shot sentiment classification across dozens of languages, including code-switched settings [6]. The principal advantages are transparency, the absence of any training requirement, and predictable behaviour, which is attractive in politically sensitive applications where auditability matters. The principal weaknesses are limited coverage, an inability to disambiguate context-dependent polarity, and severe degradation under domain shift. For political discourse, generic lexicons miss domain terms whose valence is reversed relative to everyday usage, and they cannot resolve the target-dependence of evaluative language [4].

Classical machine learning.

Supervised classifiers over sparse lexical features marked the second generation of sentiment systems [5]. Naïve Bayes, logistic regression, and support-vector machines trained on bag-of-words or term-frequency–inverse-document-frequency (TF–IDF) representations remain strong, fast, and interpretable baselines, and they continue to serve as references in shared tasks. Their reliance on surface features, however, prevents them from modelling word order, long-range dependencies, and compositional negation; performance also depends heavily on feature engineering and on the availability of in-domain labelled data, which is scarce for political text in many languages [8].

Deep neural approaches.

Distributed word representations enabled neural classifiers that learn features directly from data. Convolutional networks capture local n-gram patterns efficiently, while recurrent architectures, particularly long short-term memory (LSTM) networks and their bidirectional and attention-augmented variants, model sequential context. Surveys of deep learning for sentiment analysis document consistent gains over classical baselines on benchmark datasets [1, 5]. Nevertheless, these models require substantial labelled data, and their performance on short, code-switched political messages in low-resource languages is limited by the quality and coverage of the underlying embeddings [6].

Transformer-based and multilingual models.

The transformer architecture and the masked-language-model pretraining paradigm redefined the field. Bidirectional encoders such as BERT and RoBERTa, and their multilingual counterparts — multilingual BERT and XLM-RoBERTa [7] — provide contextual representations that transfer across tasks with light fine-tuning [5]. Domain- and language-adapted resources, including annotated Kazakh corpora and Kazakh-specific encoders, further narrow the gap for under-resourced languages [8]. Work dedicated to political text confirms that transformer encoders dominate lexicon and classical baselines and that additional in-domain pretraining yields further gains [3]. Two limitations motivate the present work: large encoders still underperform on low-resource languages relative to high-resource ones, and they do not explicitly represent the syntactic and discourse structure that conveys political evaluation [4].

Stance detection, graph models, and the present contribution.

Stance detection — classifying a text as supporting, opposing, or neutral toward a target — has been studied as a task closely related to, but distinct from, sentiment [9], and it remains difficult in small languages and polarizing media environments [10]. Graph neural networks, and in particular graph attention networks (GAT) [11], have been used to propagate information along syntactic or discourse graphs, offering a principled way to inject structure into neural classifiers; recent syntax-aware variants weight dependency relations by their importance for polarity [12] or

combine dependency graphs with prompt-based pretrained encoders [13]. Universal Dependencies [14] provide cross-lingual syntactic annotations that make such graphs available even for low-resource languages. Prior systems have explored these ingredients largely in isolation. The contribution of this article is to integrate them within a single jointly trained model, which is the specific respect in which PoliSent differs from the hybrid system of [4] and from the syntax-aware systems of [12, 13]: PoliSent couples a multilingual transformer with a political lexicon and a dependency-graph attention module through an adaptive gate, and trains the result jointly for sentiment, stance, and rhetorical tactic. Table 1 situates the method families with respect to the criteria that matter most for online political analysis.

Table 1 – Comparative summary of sentiment analysis method families for online political text

Method family	Labelled data	Interpretability	Handles structure	Typical macro-F1*
Lexicon / rule-based	None	High	Weak	0.55 – 0.65
Classical ML (TF-IDF)	Moderate	Moderate	Weak	0.66 – 0.71
Deep neural (CNN/BiLSTM)	High	Low	Partial	0.74 – 0.77
Transformer encoders	High	Low	Implicit	0.82 – 0.86
Hybrid (PoliSent, ours)	High	Moderate	Explicit	0.90

Materials and research methods.

Problem formulation.

Let a political message be a sequence of tokens $x = (w_1, \dots, w_T)$. The primary task is three-way sentiment classification, assigning x a label $y \in \{\text{negative, neutral, positive}\}$. We additionally define an auxiliary stance label $s \in \{\text{against, none, for}\}$ relative to the salient target of the message, and a rhetorical-tactic label r drawn from a small inventory (for example, appeal, irony, contrast, or none). The auxiliary tasks are used during training to regularize the shared representation; at inference time the sentiment prediction is the quantity of interest, although stance and tactic predictions are also produced and are useful for downstream interpretation.

Corpus construction and annotation.

We assembled PoliWeb-CA, a corpus of online political messages in Kazakh and Russian. Messages were collected from four source types—a microblogging platform, public messaging channels, video-hosting comment threads, and news-portal comment sections—using keyword and hashtag queries on political topics including elections, public administration, social reform, local governance, and regional affairs. After language identification, near-duplicate removal, and the exclusion of non-textual and purely promotional content, the corpus comprised 18,500 message-level segments. Table 2 reports its composition. Collection covered the period from 1 March 2023 to 28 February 2025. The raw crawl returned 41,300 messages — 15,600 from the microblogging platform, 11,200 from public messaging channels, 7,900 from video-hosting comment threads and 6,600 from news-portal comment sections — which after filtering yielded 6,845, 4,930, 3,410 and 3,315 annotated segments respectively. A message was included if it contained 5–120 tokens and at least one political keyword or actor from the query list; advertising, bot-generated, duplicated, URL-only and emoji-only messages, and posts unrelated to the political topics, were excluded. Language identification used fastText lid.176 with an acceptance threshold of 0.80, and manual checking of a 500-message sample confirmed 97.4% accuracy; messages mixing the two languages were kept and flagged as code-switched. Deduplication was performed

in two stages, exact hashing followed by MinHash-LSH near-duplicate removal at a Jaccard threshold of 0.85, which discarded 7,220 messages. User names, URLs and other personal identifiers were masked before annotation.

Table 2 – Composition of the PoliWeb-CA corpus (18,500 segments)

Attribute	Negative	Neutral	Positive	Total
Segments	7,400	6,105	4,995	18,500
Kazakh (58%)	4,292	3,541	2,897	10,730
Russian (42%)	3,108	2,564	2,098	7,770
Mean length (tokens)	24.6	21.2	22.9	23.1
Code-switched (%)	19.1	14.7	16.3	17.0

Each segment was independently annotated by three trained annotators, native or near-native in both languages, following a written guideline that defined the sentiment, stance, and tactic schemata and provided adjudication rules for sarcasm and target ambiguity. Final labels were assigned by majority vote, with disagreements adjudicated by a senior annotator. Inter-annotator agreement was substantial: the mean pairwise Cohen's κ was 0.79 for sentiment and Krippendorff's α was 0.81 across the three annotators. Cohen's κ is defined in Eq. (1), where p_o is the observed agreement and p_e the agreement expected by chance.

$$k = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} \quad (1)$$

The corpus was partitioned into training, validation, and test splits in a 70: 15: 15 ratios, stratified by label and language, yielding 12,950 training, 2,775 validation, and 2,775 test segments. Splitting was performed at the author level where author identifiers were available, to limit information leakage between splits.

Preprocessing and linguistic analysis.

Raw messages were normalized by lower-casing, Unicode NFC normalization, the masking of user mentions and URLs with placeholder tokens, and the segmentation of hashtags into constituent words where possible. Emoji were retained and mapped to sentiment-bearing tokens. Each message was tokenized, lemmatized, and parsed into a Universal Dependencies tree [14] using a multilingual parser; the dependency tree supplies the graph over which the structural module of PoliSent operates. For the lexicon stream, the political lexicon PoliLex was compiled by extending general-purpose Kazakh and Russian sentiment lexicons with domain terms and by annotating each entry with a polarity $v \in \{-1, 0, +1\}$, an intensity weight, and flags for negators and valence shifters. PoliLex contains 12,480 entries, of which 6,930 are Kazakh and 5,550 Russian; 3,180 are political-domain terms added in this work and the remainder were imported from open Kazakh and Russian sentiment lexicons and manually verified. The extension procedure had three steps: candidate terms were mined from the unlabelled political stream by a log-odds ratio against a general-domain reference corpus; two annotators then independently assigned each candidate a polarity $v \in \{-1, 0, +1\}$ and an intensity weight $\omega \in [0.5, 1.5]$; and remaining disagreements were adjudicated by a senior annotator (Cohen's $\kappa = 0.76$ for polarity and 0.71 for intensity binned into three levels). Representative entries are жемқорлық ‘corruption’ ($v = -1$, $\omega = 1.4$), тәуелсіздік ‘independence’ ($v = +1$, $\omega = 1.2$), реформа ‘reform’ ($v = +1$, $\omega = 0.9$), произвол ‘arbitrariness’ ($v = -1$, $\omega = 1.3$), the valence shifter тіпті ‘even’ ($\times 1.3$) and the negator емес ‘not’ ($\sigma = -1$).

Baseline methods.

We implemented baselines from each method family. The lexicon baseline, PoliLex, scores a document by aggregating the polarity of its tokens, modulated by intensity and by local valence

shifters, as in Eq. (2), where $|d|$ is the document length, ω_i is the intensity weight of token i , $v(w_i)$ its lexicon polarity, and $\sigma(w_i) \in \{-1, +1\}$ a negation-scope sign.

$$S_{lex}(d) = \frac{1}{|d|} \sum_{i=1}^{|d|} \omega_i v(w_i) \sigma(w_i) \quad (2)$$

The classical baselines—naïve Bayes, logistic regression, and a linear support-vector machine—operate on TF-IDF features, where the weight of term t in document d is computed as in Eq. (3); N is the number of documents and $df(t)$ the document frequency of t .

$$tfidf(t, d) = tf(t, d) \cdot \log \frac{N}{1+df(t)} \quad (3)$$

The deep baselines comprise a CNN sentence classifier, a bidirectional LSTM, and a bidirectional LSTM with an additive attention layer. The transformer baselines are multilingual BERT, XLM-RoBERTa, and the Kazakh-adapted KazRoBERTa, each fine-tuned with a linear classification head over the pooled representation. All neural classifiers terminate in a softmax layer, Eq. (4), and are trained by minimizing the categorical cross-entropy loss, Eq. (5).

$$P(y = c|x) = \frac{e^{z_c}}{\sum_{k=1}^C e^{z_k}} \quad (4)$$

$$L_{CE} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^C y_{i,c} \log \hat{y}_{i,c} \quad (5)$$

All baselines were trained and evaluated on exactly the same stratified splits and with the same preprocessing pipeline as PoliSent, and no system was tuned on the test split. The classical baselines used TF-IDF features over unigrams and bigrams (minimum document frequency 3, 50,000 features) with hyperparameters selected by five-fold cross-validation on the training split ($C \in \{0.1, 1, 10\}$ for logistic regression and the SVM, $\alpha \in \{0.1, 0.5, 1.0\}$ for naïve Bayes). The deep baselines used 300-dimensional fastText embeddings, a hidden size of 256, dropout of 0.3, Adam with a learning rate of 1×10^{-3} and a batch size of 32. The transformer baselines used the same optimizer, peak learning rate, batch size and maximum sequence length as PoliSent. Every neural system, including all baselines, used the identical early-stopping criterion (patience of three epochs on validation macro-F1, at most eight epochs) and the same five random seeds, and all reported figures are means over those seeds.

Proposed architecture: PoliSent.

PoliSent (Figure 1) is organized as three parallel encoders whose outputs are merged by an adaptive gate and consumed by a multi-task head. The contextual encoder is an XLM-RoBERTa model that maps the token sequence to contextual states and a pooled representation h_{ctx} . The self-attention operation underlying this encoder is given in Eq. (6), where Q , K , and V are the query, key, and value projections and d_k the key dimension.

$$Attn(Q, K, V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (6)$$

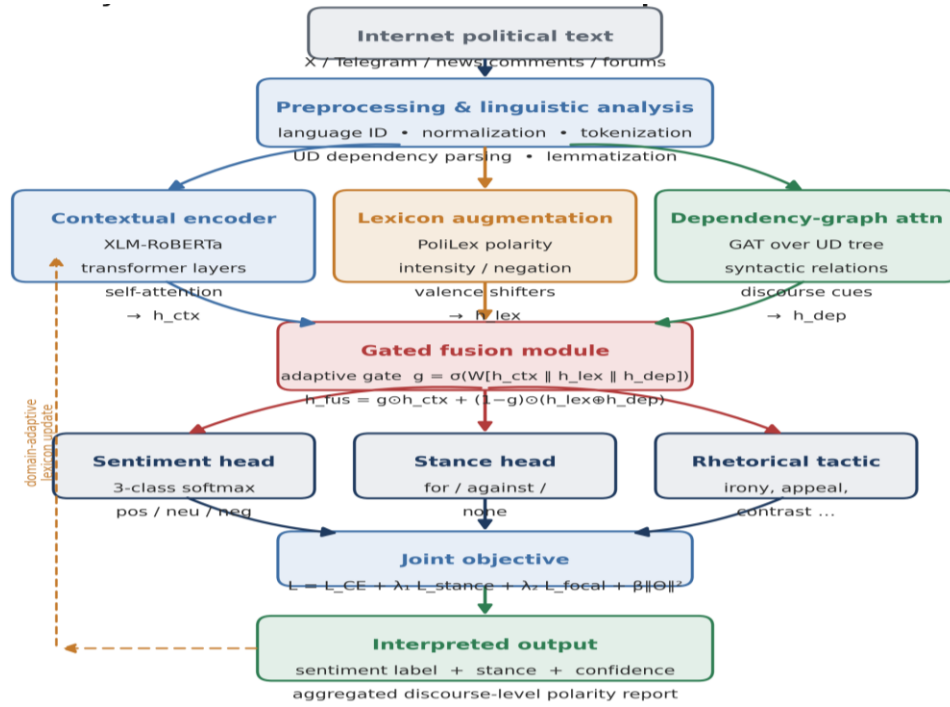


Figure 1 – Architecture of PoliSent. Three parallel encoders — a multilingual contextual transformer, a political-lexicon stream, and a dependency-graph attention module — are merged by an instance-adaptive gate and consumed by a multi-task head that jointly predicts sentiment, stance, and rhetorical tactic

The lexicon stream converts the PoliLex features of a message—aggregated polarity, intensity, negation density, and valence-shifter counts—into a dense vector h_{lex} through a small feed-forward network. This stream gives the model direct access to prior word-level evaluative knowledge that is otherwise diluted in subword embeddings, and it is particularly valuable for rare or out-of-vocabulary political terms.

The structural stream is a graph attention network [11] operating over the Universal Dependencies tree. Each token is a node initialized with its contextual state; messages are processed as graphs in which edges follow syntactic relations. The attention coefficient between a node i and a neighbour j is computed as in Eq. (7), where W is a shared linear transformation, a the attention vector, $\parallel$ denotes concatenation, and $\mathcal{N}_i$ the neighbourhood of node i .

$$\alpha_{ij} = \frac{\exp(\text{LeakyReLU}(a^T [Wh_i \parallel Wh_j]))}{\sum_{k \in \mathcal{N}_i} \exp(\text{LeakyReLU}(a^T [Wh_i \parallel Wh_k]))} \quad (7)$$

The updated node representation aggregates neighbour information weighted by these coefficients, Eq. (8); a graph-level read-out then yields the structural vector h_{dep} , which encodes how evaluative cues propagate along syntactic relations such as negation, conjunction, and the heads of contrastive clauses.

$$h'_i = \text{ELU}(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{ij} Wh_j) \quad (8)$$

The three representations are combined by an instance-adaptive gate. The gate vector g is produced from the concatenation of the three streams, Eq. (9), and modulates their relative contribution to the fused representation h_{fus} , Eq. (10), where $\odot$ is the element-wise product and $\oplus$ a learned combination. The gate allows the model to rely chiefly on contextual embeddings for

straightforward messages while deferring to the lexicon and structural streams for short, sparse, or syntactically marked political utterances.

$$g = \sigma(W_g[h_{ctx} \| h_{lex} \| h_{dep}] + b_g) \quad (9)$$

$$h_{fus} = g \odot h_{ctx} + (1 - g) \odot (h_{lex} \oplus h_{dep}) \quad (10)$$

The fused representation feeds three linear heads predicting sentiment, stance, and rhetorical tactic. Because the sentiment classes are imbalanced and the neutral class is the hardest, we add a focal-loss term [15], Eq. (11), which down-weights well-classified examples through the focusing parameter γ .

$$L_{focal} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^C y_{i,c} (1 - \hat{y}_{i,c})^\gamma \log \hat{y}_{i,c} \quad (11)$$

The full training objective, Eq. (12), is the sum of the sentiment cross-entropy, the auxiliary stance and rhetorical-tactic losses, the focal term, and an L₂ regularizer on the parameters Θ ; the coefficients λ_1 , λ_2 , λ_3 , and β balance the terms.

$$L = L_{CE} + \lambda_1 L_{stance} + \lambda_3 L_{tactic} + \lambda_2 L_{focal} + \beta \|\Theta\|_2^2 \quad (12)$$

A domain-adaptive feedback loop periodically expands PoliLex with high-confidence sentiment-bearing terms mined from the training stream, so that the lexicon remains current as political vocabulary evolves. This loop is depicted by the dashed path in Figure 1.

Both auxiliary heads of Figure 1 are therefore optimized during training: L_{stance} and L_{tactic} are ordinary cross-entropy losses computed over the stance and rhetorical-tactic heads on the same fused representation h_{fus} , weighted by $\lambda_1 = 0.30$ and $\lambda_3 = 0.15$. Eq. (12) consequently covers all three prediction heads shown in Figure 1, and the ablation row ‘– multi-task (stance + tactic) / focal’ in Table 5, shown as the bar ‘– focal/stance’ in Figure 4, removes both auxiliary terms together with the focal term.

Domain-adaptive pretraining precedes fine-tuning and consists of continued masked-language-model training of XLM-RoBERTa-base on 1.2 million unlabelled Kazakh and Russian political messages (≈ 46 million tokens) drawn from the same platforms as PoliWeb-CA but disjoint from all annotated splits. We used whole-word masking at a rate of 15%, a learning rate of 5×10^{-5} with linear decay and 5% warm-up, a batch size of 64 and 60,000 steps (about three epochs over the stream); the checkpoint with the lowest held-out perplexity was retained (14.2 against 23.8 for the unadapted encoder). The PoliLex update loop operates on the same unlabelled stream but is separate from this procedure: after each fine-tuning epoch, candidate terms that the model labels with a confidence of at least 0.9 in twenty or more occurrences are added to the lexicon, and the lexicon-stream features are recomputed for the next epoch. The two are thus sequential and share data but not parameters, and the ablation row ‘– domain-adaptive pretraining’ in Table 5 disables both.

Experimental setup.

The contextual backbone was XLM-RoBERTa-base. Inputs were truncated to 256 sub-tokens. Models were trained with the AdamW optimizer at a peak learning rate of 2×10^{-5} with a linear warm-up over the first 10% of steps, a batch size of 32, dropout of 0.1, and an AdamW weight-decay coefficient of 0.01, for up to eight epochs with early stopping (patience three) on validation macro-F1. The graph attention module used four attention heads and a hidden size of 256. The loss coefficients were $\lambda_1 = 0.3$, $\lambda_2 = 0.2$, $\lambda_3 = 0.15$, the focal focusing parameter $\gamma = 2.0$, and $\beta = 1 \times 10^{-5}$. Training was performed on two NVIDIA A100 GPUs; each run was repeated with five random seeds, and we report the mean. Hyperparameters are summarized in Table 3.

Table 3 – Principal hyperparameters of the PoliSent model

Hyperparameter	Value	Hyperparameter	Value
Backbone	XLM-R base	GAT heads	4
Max sequence length	256	GAT hidden size	256
Optimizer	AdamW	λ_1 (stance)	0.30
Learning rate	2×10^{-5}	λ_2 (focal)	0.20
Batch size	32	γ (focal)	2.0
Epochs (early stop)	8 (3)	β (L_2 term, Eq. 12)	1×10^{-5}
Dropout	0.10	Random seeds	5
AdamW weight decay	0.01	λ_3 (tactic loss)	0.15

Evaluation metrics.

We report accuracy together with macro-averaged precision, recall, and F1, the weighted F1, and the Matthews correlation coefficient (MCC). Precision and recall are defined in Eq. (13); the F1 score and its macro average over the C classes appear in Eq. (14). MCC, Eq. (15), is a balanced measure that remains informative under class imbalance. Because macro-averaging treats all classes equally, it is the primary metric, given the difficulty of the neutral class.

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}, \quad Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (13)$$

$$F_1 = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}, \quad F_1^{macro} = \left(\frac{1}{C}\right) \sum_{c=1}^C F_1^c \quad (14)$$

$$MCC = \frac{TP \cdot TN - FP \cdot FN}{\sqrt{(TP+FP)(TP+FN)(TN+FP)(TN+FN)}} \quad (15)$$

Results and discussion.*Overall comparison.*

Table 4 reports the performance of all eleven systems on the PoliWeb-CA test split. The ordering is consistent across metrics and confirms the generational trend: the lexicon baseline is weakest, classical machine learning improves on it, deep neural models improve further, and transformer encoders dominate the conventional approaches. PoliSent attains the best result on every metric, with a macro-F1 of 0.904 and an MCC of 0.857. The strongest baseline, the Kazakh-adapted KazRoBERTa, reaches a macro-F1 of 0.858; PoliSent therefore improves on it by 4.6 macro-F1 points and on the multilingual XLM-RoBERTa backbone by 5.8 points. Figure 2 visualizes the macro-F1 ranking.

Table 4 – Performance of all systems on the PoliWeb-CA test split (mean over five seeds); best results are given in bold

System	Acc.	Macro-P	Macro-R	Macro-F1	MCC
PoliLex (lexicon)	0.642	0.628	0.607	0.611	0.402
Naïve Bayes (TF-IDF)	0.688	0.671	0.652	0.659	0.476
Logistic Regression	0.709	0.694	0.681	0.686	0.509
SVM (TF-IDF)	0.724	0.712	0.698	0.703	0.536
BiLSTM	0.758	0.746	0.738	0.741	0.601
CNN	0.769	0.758	0.748	0.752	0.618

BiLSTM + Attention	0.781	0.772	0.762	0.766	0.640
mBERT	0.831	0.824	0.814	0.818	0.726
XLM-RoBERTa	0.857	0.851	0.842	0.846	0.768
KazRoBERTa	0.869	0.863	0.855	0.858	0.787
PoliSent (ours)	0.912	0.908	0.901	0.904	0.857

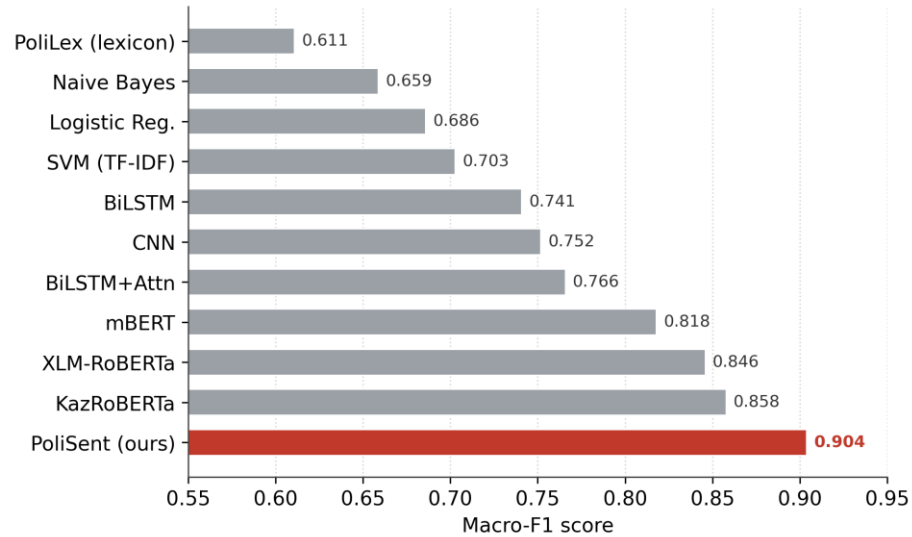


Figure 2 – Macro-F1 of the evaluated systems on PoliWeb-CA. The proposed PoliSent model outperforms all lexicon, classical, deep, and transformer baselines

Per-class performance.

Disaggregating by class clarifies where the gains arise. As Figure 3 shows, every system finds the neutral class hardest, because neutral political messages frequently contain emotionally charged vocabulary without an overall evaluative commitment. PoliSent narrows the neutral gap most: its per-class F1 scores are 0.929 for negative, 0.886 for neutral, and 0.897 for positive, compared with 0.885, 0.830, and 0.859 for KazRoBERTa. The improvement on the neutral class, 5.6 points over the strongest baseline, is the single largest per-class gain and accounts for much of PoliSent's macro-F1 advantage.

Auxiliary-task results. Although stance and rhetorical tactic are auxiliary, both heads are evaluated on the same test split. PoliSent reaches a macro-F1 of 0.812 (accuracy 0.834) for stance and 0.741 (accuracy 0.786) for rhetorical tactic, against 0.786 and 0.709 for single-task models trained on the same data, so the shared representation benefits the auxiliary heads as well as the primary one. Agreement on these two layers was lower than for sentiment: the mean pairwise Cohen's κ was 0.74 for stance and 0.68 for rhetorical tactic, with Krippendorff's α of 0.76 and 0.70 respectively. Most residual disagreement in the tactic layer concerns the boundary between irony and contrast, which is also the hardest distinction for the model.

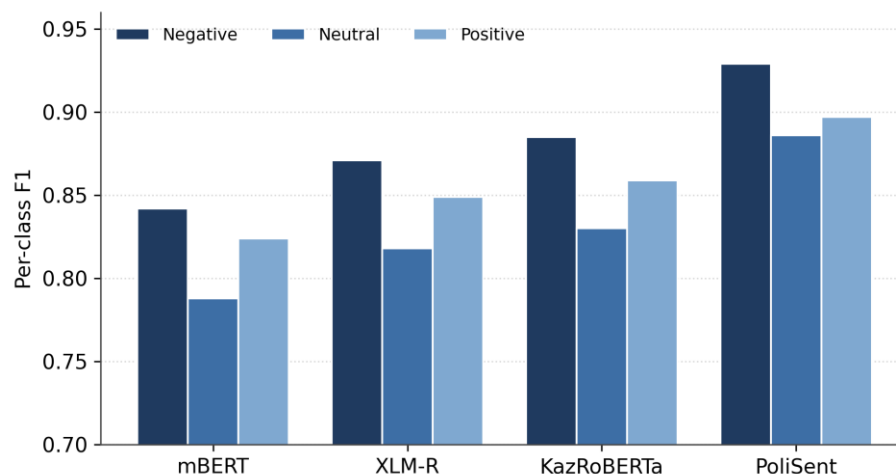


Figure 3 – Per-class F1 for the four strongest systems. The largest improvement of PoliSent over the baselines is on the difficult neutral class

Ablation study.

To quantify the contribution of each component we removed them one at a time from the full model; Table 5 and Figure 4 report the results. Removing the lexicon stream lowers macro-F1 from 0.904 to 0.882, and removing the dependency-graph attention lowers it to 0.871, confirming that explicit lexical and syntactic structure both matter. Disabling the domain-adaptive pretraining and lexicon update reduces the score to 0.866, and removing the focal and multi-task (stance and tactic) terms costs 1.5 points. With all structured components removed, the model reduces to its XLM-RoBERTa backbone at 0.846. The structured streams therefore contribute a combined 5.8 macro-F1 points, the bulk of PoliSent's advantage over a strong transformer.

Table 5 – Ablation of PoliSent components on the PoliWeb-CA test split

Configuration	Macro-F1	Δ vs. full
PoliSent (full model)	0.904	—
– multi-task (stance + tactic) / focal	0.889	–0.015
– lexicon augmentation	0.882	–0.022
– dependency-graph attention	0.871	–0.033
– domain-adaptive pretraining	0.866	–0.038
Backbone only (XLM-R)	0.846	–0.058

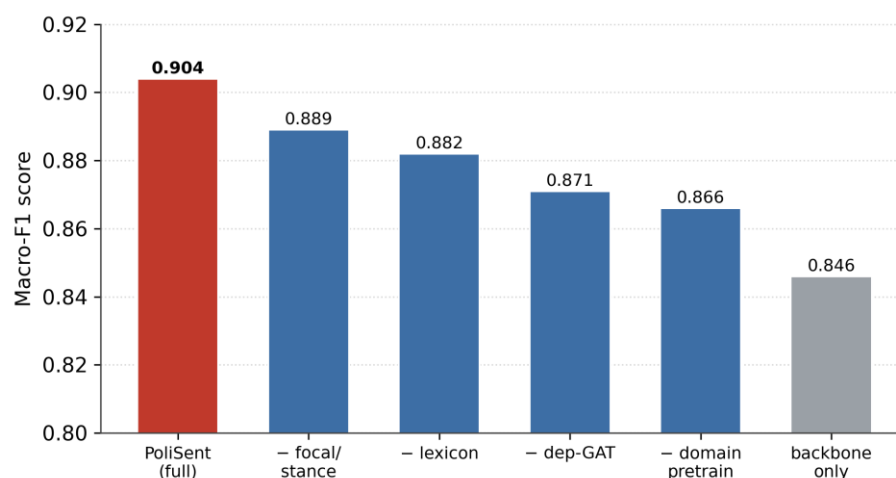


Figure 4 – Ablation of PoliSent. Each structured component contributes measurably; removing all of them recovers the transformer backbone

Error analysis.

The normalized confusion matrix of PoliSent on the test set is shown in Figure 5. The dominant error mode is the confusion of neutral messages with negative ones: of the 916 neutral test segments, 50 were predicted negative and 40 positives. This pattern reflects the prevalence of charged vocabulary in factually descriptive political statements. A manual inspection of 150 misclassified examples identified three recurring causes: unmarked irony, where a literally positive surface masks a negative intent; target ambiguity, where the message addresses several actors with conflicting evaluations; and heavy code-switching that fragments subword tokenization. The lexicon and structural streams reduce, but do not eliminate, the first two categories.

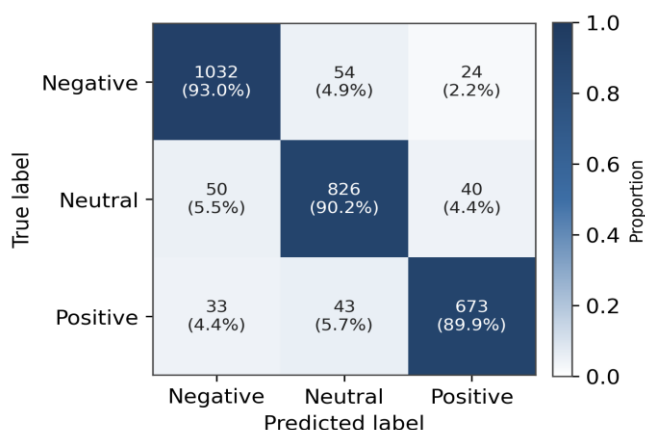


Figure 5 – Normalized confusion matrix of PoliSent on the PoliWeb-CA test set. Cells show counts and row-wise proportions

Statistical significance.

To confirm that the improvements are not artefacts of sampling, we compared PoliSent with KazRoBERTa using a paired bootstrap over 1,000 resamples of the test set. The 4.6-point macro-F1 difference is significant at $p < 0.01$, with a 95% confidence interval of [0.031, 0.061]. A McNemar test on the paired predictions yields the same conclusion ($\chi^2 = 38.7$, $p < 0.001$). The gains over the deep and classical baselines are significant at $p < 0.001$.

Discussion.

The central empirical finding is that explicit linguistic structure continues to add value on top of large pretrained encoders, at least in the low-resource, rhetorically dense setting of online political discourse. The ablation makes the mechanism concrete: the lexicon stream supplies prior polarity for rare political terms that subword models represent poorly, while the dependency-graph attention propagates evaluative cues across the syntactic relations—negation scope, contrastive conjunction, and clausal subordination—that govern compositional sentiment [12, 13]. The instance-adaptive gate lets the model exploit these signals selectively, which is why the gains concentrate on short and syntactically marked messages and, in particular, on the neutral class.

The multi-task formulation is a second source of improvement. Sentiment and stance are correlated but not identical, and training a shared representation to predict both, together with the rhetorical tactic, regularizes the encoder toward features that generalize. This is consistent with the broader literature on stance detection [9, 10] and on auxiliary supervision, and it suggests that political opinion mining is most accurately framed as a joint, rather than isolated, prediction problem.

Several limitations qualify these conclusions. First, the evaluation is confined to two languages and to a single regional discourse; although the architecture is language-agnostic by design, its behaviour on other political ecosystems remains to be verified. Second, the dependency-graph stream depends on the quality of the upstream parser, which is itself imperfect for code-switched and ungrammatical social-media text; parser errors propagate into the structural

representation. Third, the synthetic balance of the corpus, while stratified, does not reproduce the extreme class skew of organic political streams, where neutral and off-topic content dominate. Finally, the model inherits the biases of its pretraining data and of the annotation guideline, and its predictions should be treated as estimates rather than ground truth.

These limitations carry ethical weight. Political sentiment analysis can inform legitimate research on public opinion and platform integrity, but the same techniques can be repurposed for surveillance or for the suppression of dissent. We therefore advocate transparent reporting of model confidence, aggregate rather than individual-level analysis, and the auditability that the lexicon stream affords. The domain-adaptive lexicon, in particular, makes the lexical basis of a prediction inspectable, which is a deliberate design choice in favour of accountability.

Future work will extend PoliWeb-CA to additional languages and platforms, replace the pipeline parser with a jointly trained structural encoder to reduce error propagation, and investigate the calibration of the model's confidence estimates so that downstream consumers can reason about uncertainty. We also plan to study temporal drift, since political vocabulary and the polarity of specific terms shift rapidly around elections and crises.

Conclusion.

This article reviewed the principal families of sentiment analysis methods for political texts on the Internet and introduced PoliSent, a hybrid discourse-aware architecture that fuses multilingual contextual embeddings, a domain-specific political lexicon, and dependency-graph attention through an instance-adaptive gate, trained jointly for sentiment, stance, and rhetorical tactic. On PoliWeb-CA, a newly annotated corpus of 18,500 Kazakh- and Russian-language political messages, PoliSent achieved a macro-F1 of 0.904 and an MCC of 0.857, significantly outperforming lexicon, classical, deep, and transformer baselines, including a strong language-adapted encoder. Ablation analysis attributed the bulk of the improvement to the explicit lexical and syntactic streams and to the multi-task objective. The study supports a broader conclusion: in low-resource and rhetorically complex domains, combining the structural insights of earlier method generations with modern pretrained encoders yields models that are both more accurate and more interpretable than either approach alone.

References

1. Wankhade, M., Rao, A. C. S., & Kulkarni, C. (2022). A survey on sentiment analysis methods, applications, and challenges. *Artificial Intelligence Review*, 55(7), 5731–5780. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10144-1>
2. Nandwani, P., & Verma, R. (2021). A review on sentiment analysis and emotion detection from text. *Social Network Analysis and Mining*, 11(1), Article 81. <https://doi.org/10.1007/s13278-021-00776-6>
3. Mochtak, M., Rupnik, P., Kuzman, T., & Ljubešić, N. (2025). ParlaSent: Mapping sentiment in political discourse with large language models. *Political Research Exchange*, 7(1), Article 2508377. <https://doi.org/10.1080/2474736X.2025.2508377>
4. Zulkhazhav, A., Bekmanova, G., Yergesh, B., Nazyrova, A., Lamasheva, Z., & Aimicheva, G. (2026). A multi-level hybrid architecture for structured sentiment analysis. *Electronics*, 15(2), Article 249. <https://doi.org/10.3390/electronics15020249>
5. Tan, K. L., Lee, C. P., & Lim, K. M. (2023). A survey of sentiment analysis: Approaches, datasets, and future research. *Applied Sciences*, 13(7), Article 4550. <https://doi.org/10.3390/app13074550>
6. Koto, F., Beck, T., Talat, Z., Gurevych, I., & Baldwin, T. (2024). Zero-shot sentiment analysis in low-resource languages using a multilingual sentiment lexicon. In *Proceedings of the 18th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics (Vol. 1, pp. 298–320)*. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/2024.eacl-long.18>

7. Conneau, A., Khandelwal, K., Goyal, N., Chaudhary, V., Wenzek, G., Guzmán, F., Grave, E., Ott, M., Zettlemoyer, L., & Stoyanov, V. (2020). Unsupervised cross-lingual representation learning at scale. In Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (pp. 8440–8451). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/2020.acl-main.747>
8. Yeshpanov, R., & Varol, H. A. (2024). KazSAnDRA: Kazakh sentiment analysis dataset of reviews and attitudes. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.19335>
9. Alturayef, N., Luqman, H., & Ahmed, M. (2023). A systematic review of machine learning techniques for stance detection and its applications. Neural Computing and Applications, 35(7), 5113–5144. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08285-7>
10. Mets, M., Karjus, A., Ibrus, I., & Schich, M. (2024). Automated stance detection in complex topics and small languages: The challenging case of immigration in polarizing news media. PLOS ONE, 19(4), Article e0302380. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302380>
11. Veličković, P., Cucurull, G., Casanova, A., Romero, A., Liò, P., & Bengio, Y. (2018). Graph attention networks. In Proceedings of the 6th International Conference on Learning Representations. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.10903>
12. Jiang, T., Wang, Z., Yang, M., & Li, C. (2023). Aspect-based sentiment analysis with dependency relation weighted graph attention. Information, 14(3), Article 185. <https://doi.org/10.3390/info14030185>
13. Feng, A., Liu, T., Li, X., Jia, K., & Gao, Z. (2024). Dual syntax aware graph attention networks with prompt for aspect-based sentiment analysis. Scientific Reports, 14(1), Article 23528. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74668-y>
14. de Marneffe, M.-C., Manning, C. D., Nivre, J., & Zeman, D. (2021). Universal Dependencies. Computational Linguistics, 47(2), 255–308. https://doi.org/10.1162/coli_a_00402
15. Lin, T.-Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., & Dollár, P. (2017). Focal loss for dense object detection. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (pp. 2999–3007). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.324>

КӨПТІЛДІ САЯСИ ДИСКУРСҚА АРНАЛҒАН ДИСКУРСТЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРДІ ЕСКЕРЕТІН ГИБРИДТІ ҚҰРЫЛЫМ

Аңдатпа. Саяси коммуникация әлеуметтік платформаларға ауысып, пікірлер қысқа, код ауыстыру элементтері кездесетін және риторикалық тұрғыдан күрделі хабарламалар арқылы білдірілетін болды. Өнімдер мен қызметтерге қатысты пікірлерді талдауға бейімделген дәстүрлі сентимент талдау жүйелері саяси салаға тиімді түрде қолданылмайды, өйткені саяси полярлық автордың ұстанымымен (*stance*), ирониямен және мәтіннің дискурстық құрылымымен тығыз байланысты. Бұл мақалада сентимент талдаудың негізгі әдістері — лексиконға негізделген тәсілдер, классикалық машиналық оқыту әдістері, терең нейрондық желілер және трансформерлік модельдер қарастырылып, интернеттегі саяси пікірлердің тоналдылығын анықтауға арналған *PoliSent* атты гибриді дискурсқа бағдарланған архитектура ұсынылады.

PoliSent үш өзара толықтырушы ақпарат көзін біріктіреді: *XLM-RoBERTa* кодтаушысы қалыптастыратын көптілді контекстік эмбедингтерді, тоналдылық күшейткіштері мен терістеулерді ескеретін арнайы саяси лексиконды (*PoliLex*), сондай-ақ *Universal Dependencies* синтаксистік тәуелділіктеріне негізделген графтық назар (*graph attention*) модулін. Бұл белгілерді біріктіру үшін үйренілетін қақпалау механизмі (*gating mechanism*) пайдаланылады, ал көптапсырмалы мақсаттық функция сентиментті, саяси ұстанымды және риторикалық тактиканы бірлесіп болжауды қамтамасыз етеді.

Ұсынылған тәсілдің тиімділігі *PoliWeb-SA* деп аталатын жаңа корпуста бағаланды. Корпус микроблогтардан, хабар алмасу арналары мен жаңалықтарға жазылған пікірлерден жиналған қазақ және орыс тілдеріндегі 18 500 саяси хабарламадан

тұрады. *PoliSent* моделі *Macro-F1* көрсеткіші бойынша 0,904 және Мэттьюс корреляция коэффициенті (MCC) бойынша 0,857 нәтижелеріне қол жеткізіп, бейімделіп оқытылған *KazRoBERTa* моделінен 4,6 *Macro-F1* ұпайына жоғары нәтиже көрсетті және барлық лексикондық, классикалық және терең оқытуға негізделген базалық модельдерден айтарлықтай басым болды ($p < 0,01$, жұптық *bootstrap* талдауы). Абляциялық зерттеу нәтижелері архитектураның әрбір құрамдас бөлігі жалпы өнімділікке елеулі үлес қосатынын көрсетті. Әсіресе тәуелділік графына негізделген назар механизмі мен лексикалық толықтыру контекстік негізбен салыстырғанда нәтижені 5,8 ұпайға жақсартты.

Алынған нәтижелер ірі алдын ала оқытылған тілдік модельдер дәуірінде де тілдік құрылымды айқын түрде пайдаланудың маңыздылығын дәлелдейді, әсіресе ресурсы шектеулі және морфологиялық тұрғыдан күрделі саяси мәтіндер үшін.

Түйін сөздер: сентимент талдау, саяси дискурс, пікірлерді талдау, табиғи тілді өңдеу, трансформерлік модельдер, графтық назар желілері, ұстанымды анықтау, ресурсы шектеулі тілдер, қазақ тілі, көптілді табиғи тілді өңдеу.

ГИБРИДНАЯ ДИСКУРСИВНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ АРХИТЕКТУРА ДЛЯ АНАЛИЗА МНОГОЯЗЫЧНОГО ПОЛИТИЧЕСКОГО ДИСКУРСА

Аннотация. Политическая коммуникация переместилась на социальные платформы, где мнения выражаются в виде коротких сообщений с переключением языковых кодов и высокой риторической насыщенностью. Традиционные системы анализа тональности, разработанные преимущественно для отзывов о товарах и услугах, плохо переносятся на политическую сферу, поскольку политическая полярность тесно связана с позицией автора (*stance*), иронией и дискурсивной структурой текста. В данной статье рассматриваются основные семейства методов анализа тональности — лексикон-ориентированные, классические методы машинного обучения, глубокие нейронные сети и подходы на основе трансформеров, а также предлагается *PoliSent* — гибридная дискурсивно-ориентированная архитектура для анализа политической тональности в интернете.

PoliSent объединяет три взаимодополняющих источника информации: многоязычные контекстные эмбединги, формируемые энкодером *XLM-RoBERTa*, специализированный политический лексикон (*PoliLex*) с учетом модификаторов тональности и отрицаний, а также модуль графового внимания, работающий на основе синтаксических зависимостей *Universal Dependencies*. Для объединения этих признаков используется обучаемый механизм шлюзования (*gating mechanism*), а многозадачная функция потерь обеспечивает совместное прогнозирование тональности, политической позиции и риторической тактики.

Для оценки эффективности модели был создан корпус *PoliWeb-CA*, содержащий 18 500 политических сообщений на казахском и русском языках, собранных из микроблогов, каналов обмена сообщениями и комментариев к новостям. Модель *PoliSent* достигла значения *Macro-F1*, равного 0,904, и коэффициента корреляции Мэттьюса (MCC), равного 0,857, превзойдя дообученную модель *KazRoBERTa* на 4,6 пункта по метрике *Macro-F1* и значительно опередив все лексиконные, классические и глубокие базовые модели ($p < 0,01$, парный бутстреп-анализ). Исследование абляции показало, что каждый архитектурный компонент вносит существенный вклад в итоговую производительность, при этом модуль внимания на графе зависимостей и лексическое расширение совместно обеспечивают улучшение на 5,8 пункта по сравнению с контекстным базовым представлением.

Полученные результаты демонстрируют, что явное использование лингвистической структуры сохраняет свою ценность даже в эпоху крупных

предварительно обученных языковых моделей, особенно для малоресурсных и морфологически богатых политических текстов.

Ключевые слова: анализ тональности, политический дискурс, анализ мнений, обработка естественного языка, трансформерные модели, графовые сети внимания, определение позиции, малоресурсные языки, казахский язык, многоязычная обработка естественного языка.

Information about the authors

Ayaulym Sairanbekova	L.N. Gumilyov Eurasian National University, Institute of Digital Sciences and Artificial Intelligence, Department of Artificial Intelligence Technologies, Educational Program “Artificial Intelligence”, position – PhD Doctoral Student, E-mail: sairanbekova98@gmail.com
Gulmira Bekmanova	Candidate of Technical Sciences, PhD, Professor, Member of the Management Board – Vice-Rector for Digitalization, Digital Officer, L.N. Gumilyov Eurasian National University, E-mail: bekmanova_gt@enu.kz .
Valentina Franzoni	Associate Professor, Department of Mathematics and Computer Science, University of Perugia, Perugia, Italy. H-index: 21. Scopus Author ID: 25521823700. Web of Science ResearcherID: AAC-7783-2021. ORCID: 0000-0002-2972-7188. E-mail: valentina.franzoni@unipg.it
Tuleshov Yerkebulan	Institute of Automation and Information Technologies, Department of Robotics and Technical Means of Automation, Satbayev University, Almaty 050013, Kazakhstan. y.tuleshov@satbayev.university

Авторлар туралы мәліметтер

Аяулым Сайранбекова	Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Цифрлық ғылымдар және жасанды интеллект институты, Жасанды интеллект технологиялары кафедрасы, «Жасанды интеллект» білім беру бағдарламасының докторанты, E-mail: seitkaliyeva_gm@enu.kz
Гульмира Бекманова	техника ғылымдарының кандидаты, PhD, профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Басқарма мүшесі – цифрландыру жөніндегі проректоры, Digital Officer, E-mail: bekmanova_gt@enu.kz .
Валентина Францони	Италиядағы Перуджа университетінің Математика және компьютерлік ғылымдар кафедрасының қауымдастырылған профессоры. Хирш индексі (H-index): 21. Scopus Author ID: 25521823700. Web of Science ResearcherID: AAC-7783-2021. ORCID: 0000-0002-2972-7188. Электрондық пошта: valentina.franzoni@unipg.it
Тулешов Еркебулан Амандыкович	Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар институты, Робототехника және автоматтандырудың техникалық құралдары кафедрасы, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан, E-mail: y.tuleshov@satbayev.university

Сведение об авторах

Аяулым Сайранбекова	Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Институт цифровых наук и искусственного интеллекта, кафедра технологий искусственного интеллекта, докторант образовательной программы «Искусственный интеллект», E-mail: seitkaliyeva_gm@enu.kz .
Гульмира Бекманова	кандидат технических наук, PhD, профессор, член Правления – проректор по цифровизации, Digital Officer Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, E-mail: bekmanova_gt@enu.kz .
Валентина Францони	доцент кафедры математики и компьютерных наук Университета Перуджи (Италия). Индекс Хирша (H-index): 21. Scopus Author ID: 25521823700. Web of Science ResearcherID: AAC-7783-2021. ORCID: 0000-0002-2972-7188. E-mail: valentina.franzoni@unipg.it
Тулешов Еркебулан Амандыкович	Институт автоматизации и информационных технологий, кафедра робототехники и технических средств автоматизации, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, E-mail: y.tuleshov@satbayev.university



УДК 681.58; 621.391.63.

МРНТИ 50.05, 50.41

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_12

Ф.К.Абитаев¹, Б.Н.Азаматов¹, В.А.Корнев¹, К. Алибеккызы^{1*}, Р.Е. Жанбосинов¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени
Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*E-mail: karlygash.alibekkyzy@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЦИФРОВОЙ ЗРЕЛОСТИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ АГРОИНЖИНИРИНГА

Аннотация. Цель работы состоит в повышении качества агроинжиниринга кормопроизводства крупного рогатого скота в условиях Восточного Казахстана. Сельхозпроизводство Казахстана относится к зоне повышенного риска, в связи с чем в работе в качестве ключевых критериев качества агроинжиниринга использованы риск производителя и риск потребителя сельхозпродукции. Особенно остро и проблематично представляется реализация задач в данном научно-производственном контексте по причине недостаточной научной изученности предметной области, особенно в региональном природно-климатическом и географическом аспектах. В современных цифровых системах управления производством ключевое значение приобретают опережающий мониторинг и контроль. В работе рассматривается новый подход, состоящий в том, что управление конвертируется в систему агроинжиниринга, в котором риски рассматриваются как критерии цифровой зрелости бизнес-среды. В животноводстве, как показывает практика, решающую роль играет качество кормов, контроль которого не представляется возможным без использования современных digital-решений на всех без исключения технологических переделах кормопроизводства. Для квалиметрического оценивания процессов контроля по критерию цифровой зрелости как в интегральном, так и дифференциальном форматах, в работе предлагается новая модель на принципах нечеткости агентов управления, что повышает качество процесса принятия решений.

Ключевые слова: агроинжиниринг, кормопроизводство, риск, цифровая зрелость, контроль, модель.

Введение.

Цель работы состоит в повышении качества агроинжиниринга кормопроизводства крупного рогатого скота в условиях Восточного Казахстана. В новой парадигме цифровой трансформации экономики, акценты результативности технологий управления смещаются от точечной цифровизации отдельных digital-решений к интегрированной системотехнике на платформе больших данных [1]. Вопрос о дальнейших путях развития интеграционных подходов пока однозначно не решен, и по нашему мнению единого рецепта быть не может. В каждом конкретном случае, учитывая множество факторов социально-экономического, политического и регионального характера, опираясь на научное исследование реальной ситуации, тогда только можно строить прогнозы и рекомендации по стратегическому развитию хозяйствующего субъекта.

В интегрированных системах цифровизации технологических переделов кормопроизводства выполняются следующие процедуры: контроль функционирования объекта (процесса) по информации, поступающей из внешней и внутренней среды, например, процессов измельчения, дозирования, смешивания кормов и т.д, контроль отдельных физико-биологических показателей объекта контроля [2]. Количественная оценка и прогнозирование рисков в настоящее время является одной из актуальных проблем в науке управления. Один из современных подходов в решении данной проблемы состоит в использовании новых цифровых технологий на платформе цифровых двойников [3].

Одной из актуальных задач цифровой трансформации бизнес-процессов является обеспечение роста качества управления, что наиболее эффективно, как показывает литературный анализ, решается на основе разработки и использования цифровых двойников (ЦД) предприятия. Как показывает анализ доступных публикаций, в сельском хозяйстве ЦД в настоящее время применяются крайне редко в силу того, что АПК технологически намного сложнее, чем другие отрасли производства. Цифровые двойники в настоящем исследовании предлагается использовать в качестве механизма и инструмента опережающего мониторинга цифровой зрелости системы управления качеством кормопроизводства [4].

Контрольно-измерительные процедуры в системе управления качеством кормопроизводства осуществляются в условиях высокой неопределенности данных и параметрической нечеткости агентов управления, что порождает риски [5].

В результате анализа текущего состояния цифровизации бизнес-процессов, а также следуя закону Республики Казахстан, определяющего перспективы цифровой трансформации экономики государства, считается целесообразным в исследовании развития цифровых технологий хозяйствующего субъекта ориентироваться: на кастомизацию, т.е. изменение продукта под потребности и желания конкретного потребителя; сбор больших данных и предиктивную аналитику; «умный» контроль; оптимизацию бизнес-процессов. Все вышеназванные цифровые технологии связаны между собой не только корреляционной связью, но они технологически не могут существовать раздельно и тем самым дискредитировать сам смысл интеграции.

Ключевую роль в процессе интеграции играют большие данные (big data), так как на локальных объемах данных в принципе нельзя построить «цифровой двойник», цифровую аналитику и имитационные модели, а также Data Mining. Только на больших данных может быть реализован прецедентный подход, на котором строятся искусственный интеллект (ИИ), нейросетевые решения и машинное обучение, предиктивная аналитика и ряд других цифровых инструментов [6].

При этом представляется крайне важным не отождествлять «Искусственный интеллект», «Машинное обучение» и «Нейронные сети». На различие между этими понятиями указывается в работах [7] и приводится рисунок для визуализации этого различия (рис. 1). Как следует из данного рисунка, «нейротехнология является одной из технологий машинного обучения, которое, в свою очередь, является одной из технологий искусственного интеллекта.



Рисунок 1 – Связь между нейронными сетями, машинным обучением и искусственным интеллектом

Нейротехнологии и искусственный интеллект служат: для выявления взаимосвязей между явлениями, предиктивной аналитики, интеллектуального анализа данных и т.д. [8].

Материалы и методы исследования.

Объектом предметного исследования являются бизнес-процессы предприятия ТОО «Опытное хозяйство масличных культур» (ОХМК), которое занимается производством оригинальных семян, семян высших репродукций подсолнечника и зерновых культур, товарным производством сельскохозяйственной продукции, молочным животноводством. В таблице 1 приведены структурно-организационные данные ОХМК.

Таблица 1 – Структурно-организационные данные ТОО «Опытное хозяйство масличных культур»

Подразделение	Кол-во должностей	Кол-во работников
Тракторно-полеводческая бригада	13	56
Автогараж	17	71
Мехток	5	21
ЗНКИ (новый мехток, в котором размещен комбикормовый цех)	9	23
Наука	13	30
МТМ	5	6
Энергоцех	5	12
Столовая	5	9
АУП	19	36
Стройцех	7	17
Охрана	3	33
Ферма	22	75
ИТОГО:	101	389

Научно-практическая концепция предметного исследования опирается на идею агроинжиниринга, как сложной стохастически-программированной системы в условиях цифровой трансформации бизнес-среды. Объектом исследования являются бизнес-процессы ТОО «Опытное хозяйство масличных культур» (ОХМК), территориально расположенного в Восточно-Казахстанской области, а географически в предгорьях Южного Алтая [1]. В концептуальном методологическом плане предмет исследования рассматривается с позиций процессной системной динамики. Бизнес-среда и бизнес-процессы ОХМК в предметном контексте исследования поддерживаются Государственными и региональными программами Цифровой трансформации. Ключевым бизнес-процессом, вынесенным в предмет исследования, является – кормопроизводство, которое в аграрном секторе (АС) связывает все технологические переделы сельхозпроизводства в единую целевую систему обеспечения населения продукцией животноводства. Кормопроизводство является интегрирующим системным фактором в обеспечении эффективного управления агрокомплексом путем рационального природопользования и поддержки необходимого баланса между многими отраслями. Важным фактором в повышении качества управления в АС Республики Казахстан является широкое внедрение достижений науки и техники на базе цифровых технологий на всех этапах жизненного цикла агропроизводства. В качестве контекстной идеи в управлении результативностью бизнес-процессов выбрана - «Индустрия 4.0» [9]. Выбор данной концептуальной платформы обоснован тем, что в бизнес-деятельности хозяйствующего субъекта композиционно представлены агенты материального и нематериального (виртуального) происхождения, особенно в векторе управления, где порождаются риски, имеющие на этапе формализации нематериальную сущность. Риски приобретают материальное измерение после этапа реализации принятого решения на практике, например, в кормопроизводстве на технологических переделах - измельчения, смешивания, дозирования и т.д.

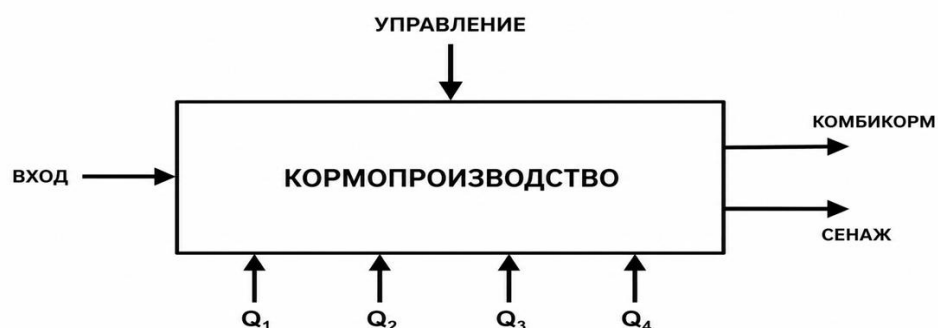
Композиционно объединить и количественно оценить разнородные сущности бизнеса, в условиях цифровой трансформации, предлагается интегральным вектор-критерием - «Цифровая зрелость» (ЦЗ). Модель управления качеством кормопроизводства ОХМК по критерию ЦЗ рассматривается как киберпространство, в которой обязательным звеном является обратная связь – «коррекция». В процессе формализации задач теоретического исследования данной предметной области, используется многоподходный принцип на базе таких математических разделов как: теория вероятности и математическая статистика, имитационное моделирование, теория нечетких множеств, экспертные оценки, агентный подход. Для формализации процесса количественного оценивания и прогнозирования цифровой зрелости агроинжиниринга объекта используется аппарат теории нечетких множеств.

Результаты и их обсуждение.

Главной задачей сельского хозяйства является: обеспечить население продуктами питания и некоторыми видами сырья необходимого для легкой промышленности. Сельхозпроизводство тесно привязано к конкретным природно-климатическим и географическим условиям хозяйствующего субъекта, что является одним из главных факторов, влияющих на его производственные показатели. В бизнес-деятельности ОХМК ключевой проблемой является – кормопроизводство. Как отмечается во многих работах - «Кормопроизводство связывает в единую систему все отрасли аграрного сектора. Оно обеспечивает эффективное управление сельскохозяйственными землями и рациональное природопользование, поддерживает необходимый баланс отраслей» [3,4]. Обеспечить выполнения всех требований и рецептуры кормов невозможно без привлечения цифровых технологий, что требует концепция агроинжиниринга, отраженная в политике цифровых агентов агропромышленного комплекса Республики Казахстан.

В интегрированных системах цифровыми агентами выполняются следующие процедуры: контроль функционирования объекта (процесса) по информации, поступающей от внешних источников; обработка измерительной информации; коррекция модели опережающего мониторинга и контроля, обеспечивая «обучение» системы. Цифровые агенты в сложных стохастически - программируемых системах интегрируются в мультиагентные интеллектуальные композиции [10].

В соответствии со стандартами ISO 9001/2015 и IDEF0, процесс кормопроизводства в предлагаемой работе представлен контекстным блоком (рис.2), который содержит четыре функциональных агрегаций. Левая агрегация представляет «Вход», куда входят не только материальные ресурсы, но и информационные потоки. В самом блоке указан целевой функционал – «кормопроизводство». Правая агрегация блока является выходом процесса, который демонстрирует системный технологический результат, состоящий из готового продукта производства - силоса и сенажа. Нижняя агрегация блока является композицией агентов обеспечения - Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 .



Q_1 – кадровые ресурсы, Q_2 – кормовые ресурсы, Q_3 – технические ресурсы,
 Q_4 – финансовые ресурсы.

Рисунок 2 – IDEF0 - модель контекст процесса кормопроизводства

Данная модель интегрирует в себе все множество ресурсов и инструментов агроинжиниринга на примере процесса кормопроизводства, среди которых, как акцентируется во многих исследованиях - ключевое значение приобретают «Кормовые ресурсы» и система кормопроизводства в целом. Качество кормления КРС определяется рационом кормления и составом ингредиентов в рационе (таб.2).

Таблица 2 – Весомость ингредиентов рациона кормления дойных коров в условиях ОХМК

Ингредиент	m_i	СВ кг/день	КС кг/день
Сено злаковое	m_1	0,4	0,5
Силос кукурузный.	m_2	10,0	33,0
Сенаж люцерны 2024...	m_3	1,26	4,00
Подсолнечниковый ш...	m_4	1.80	2.0
Премикс Каргилл 7469	m_8	0.087	0.100
Соль	m_9	0.099	0.100

Качество кормления контролируется в реальном масштабе времени, и реализовано на платформе «Цифровой двойник» с использованием принципов «Опережающего контроля». В подобном digital-решении, чтобы скорректировать фактор субъективности, предлагается многоподходная технология, использующая композицию из экспертного метода, теории нечетких множеств и нейронного моделирования.

Теория нечетких множеств использована для построения модели агрегированного оценивания качества кормления путем математической свертки результатов количественных, дифференцированных нечетких оценок по лингвистическим показателям – переменным (ЛП). Для количественной свертки дифференцированных оценок привлекается нейронная методология, опирающаяся на принципы и проектно-технологические ресурсы искусственного интеллекта [5,6].

Для нечеткого моделирования были дифференцированные показатели качества кормления КРС, приведенные в таблице 2. Тогда, выше отмеченные ингредиенты кормления в «нечеткой модели» будут фигурировать как «лингвистические переменные» (ЛП). Лингвистическая переменная определяется на поле нечеткости в количественном формате совокупностью термов, которые имеют аналитическую и графическую форму численного определения «степени принадлежности» ЛП.

Области определения ЛП в каждом случае находятся экспериментально. В данном случае область определения идентифицируется в процентном измерении (%), как мера приближения к цели управления. В данной задаче, в результате предварительных исследований нечетких подходов в практических приложениях, было выявлено, что функции принадлежности в общем виде наиболее приемлемы в следующем аналитическом формате:

$$MF(x) = \begin{cases} 1 - \frac{b-x}{d-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ 1 - \frac{x-c}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (1)$$

где тройка чисел (a, b, c) определяет форму этих функций.

Результаты нечеткой интерпретации критериев качества ингредиентов кормления представлены в графической форме на следующих рисунках 3-6:

а) $A_1(x)$ – «Сено злаковое»

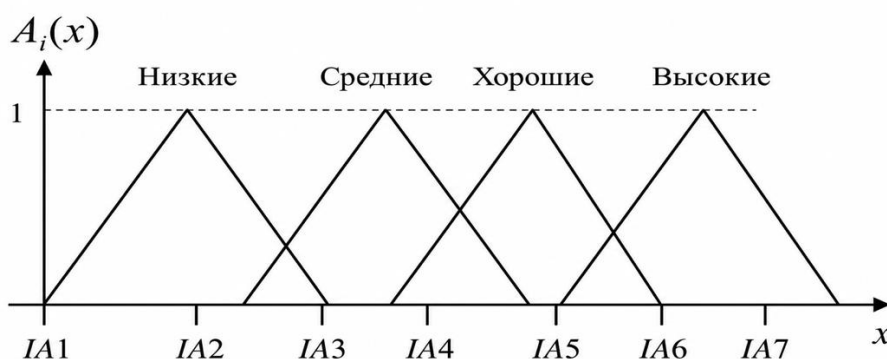


Рисунок 3 – Функции принадлежности лингвистической переменной $A_1(x)$ «Сено злаковое»

б) $A_2(x)$ – «Силос»;

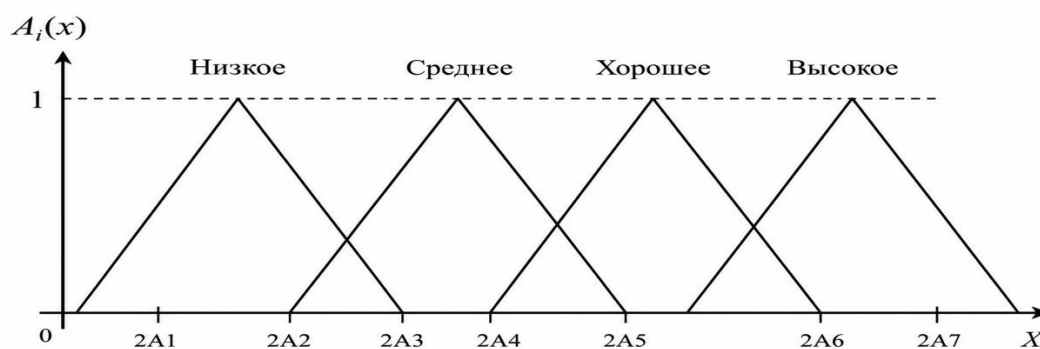


Рисунок 4 – Функции принадлежности ЛП «Силос»

в) $A_3(x)$ – «Сенаж»;

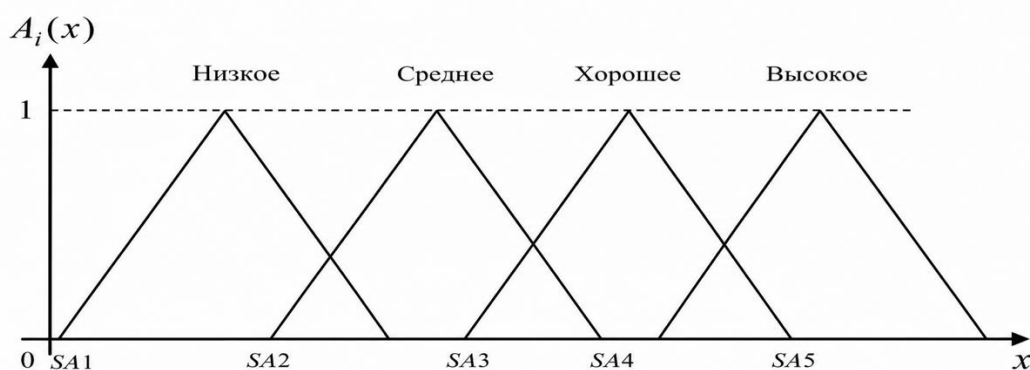


Рисунок 5 – Функции принадлежности (термы) лингвистической переменной «Сенаж» $A_3(x)$

г) $A_4(x)$ – «Шпрот»;

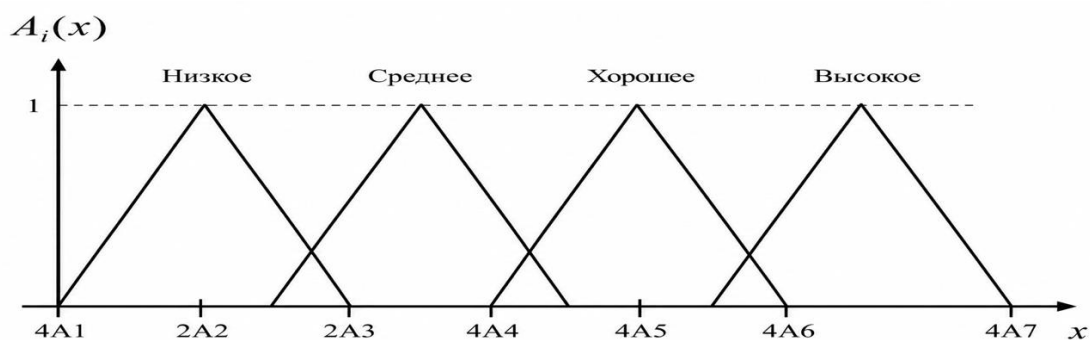


Рисунок 6 – Функции принадлежности (термы) лингвистической переменной «Шпрот» $A_4(x)$

д) $A_5(x)$ – «Премикс»;

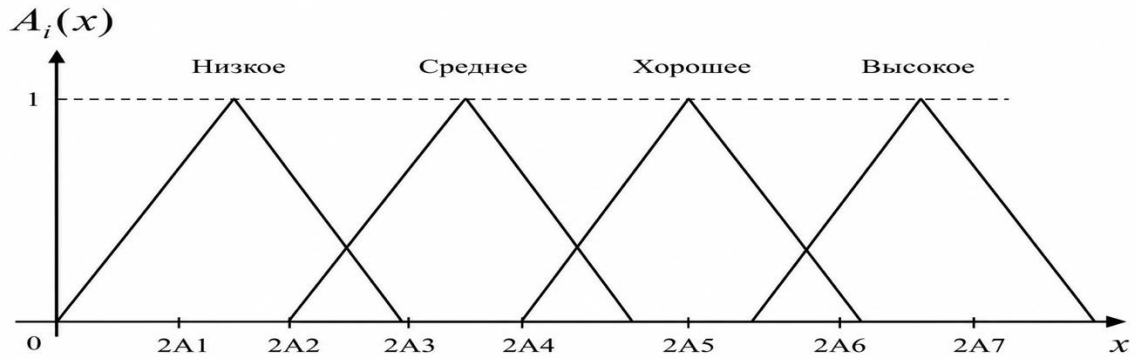


Рисунок 7 – Функции принадлежности (термы) лингвистической переменной «Премикс» $A_5(x)$

е) K_6 - «Соль»;

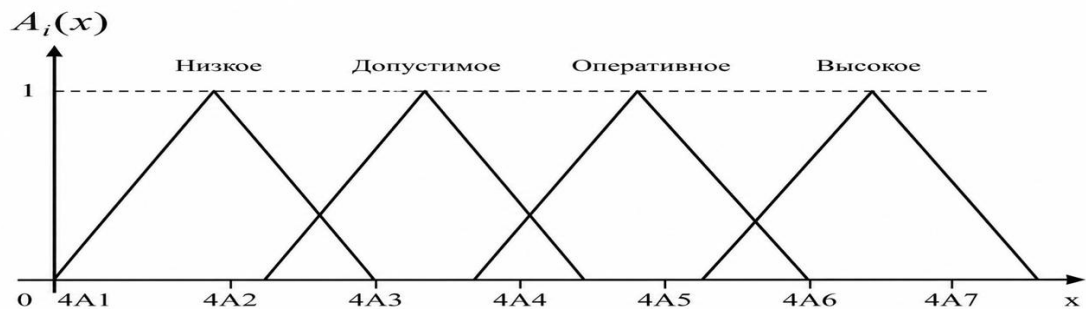


Рисунок 8 – Функции принадлежности (термы) лингвистической переменной «Соль» $A_6(x)$

Для количественного оценивания интегральной оценки (свертки) качества кормления, при имеющихся дифференциальных нечетких измерениях, в работе использовался нейронный подход. Нейронный подход реализован в форме программного digital-решения. Данное программное решение эксплуатируется в реальном масштабе времени. История возникновения термина нейрон, и описание его функциональных свойств начинается в 1943 году, когда Уоррен Мак Каллок и Уолтер Питтс разработали математическую модель нейрона, которая в графической интерпретации представлена рисунком 9 [7].

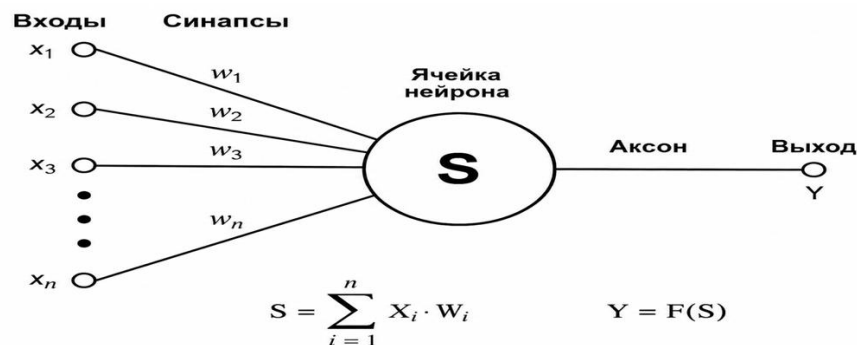


Рисунок 9 – Нейронная модель управления объектом
В рабочей нечеткой модели СМК данные $x_1...x_6$ являются лингвистическими

переменными (ЛП), обозначенными выше. В соответствии методологией нейронного подхода (рис.8). первым этапом осуществляется ранжирование лингвистических переменных по 10-ти бальной системе 6-ю экспертами. Эксперты находятся территориально в разных географических адресах, и экспертное оценивание всех этапов, осуществляется анонимно в режиме онлайн. Реализация данной операции выполняется в первом скрытом нейронном слое.

Второй этап экспертизы предусматривает сбор и обработку анкетной информации по всем экспертам и запускается работа второго скрытого нейронного слоя.

Третьим этапом начинает работать первый открытый нейронный слой, в результате чего формируется массив-таблица (табл. 3.)

Таблица 3 – Результаты экспертно-нейронного оценивания и обработки лингвистических переменных СМК

№ эксперта	ЛП (Ai)					
	A ₁ (x)	A ₂ (x)	A ₃ (x)	A ₄ (x)	A ₅ (x)	A ₆ (x)
1	0,25	0,214	0,357	0,178	0,357	0,357
2	0,241	0,172	0,310	0,275	0,310	0,310
3	0,235	0,264	0,294	0,205	0,294	0,294
4	0,205	0,235	0,264	0,294	0,264	0,264
5	0,2	0,3	0,266	0,233	0,266	0,266
Вес ω_i	0,226	0,237	0,298	0,237	0,298	0,298

Четвертым этапом работает третий скрытый слой и формируется массив весовости термов (Ki1; Ki2; Ki3; Ki4; Ki5; Ki6) размером 4х6. «вес» каждого термина соответствующей лингвистической переменной также, как и «вес» лингвистической переменной, определены нейронно - экспертным методом и представлены в табл. 4.

Таблице 4 – Результаты формирования итоговой экспертно-нейронной обработки

Лингвистические переменные	Вес ЛП ω_i	Вес термов			
		ω_{i1}	ω_{i2}	ω_{i3}	ω_{i4}
Сено злаковое	ω_1	0,053	0,088	0,229	0,306
Силос кукурузный	ω_2	0,254	0,362	0,275	0,108
Сенаж люцерны	ω_3	0,060	0,096	0,205	0,310
Подсолнечниковый шрот	ω_4	0,051	0,098	0,197	0,339
Премикс Каргилл	ω_5	0,042	0,090	0,236	0,328
Соль	ω_6	0,041	0,088	0,208	0,348

Функции принадлежности всех термов ЛП аналитически выражаются формулами (1), которые определяются на поле термов тремя параметрами а, b, с.

Следующим этапом после завершения предыдущих экспертных операций и преобразований, является итоговый количественный расчет интегральной оценки качества кормления исследуемого хозяйствующего субъекта. Показатель качества кормления - K_{Σ} находится по следующим формулам:

$$K_{\Sigma} = (w_1*y_1 + w_2*y_2 + w_3*y_3 + w_4*y_4 + w_5*y_5 + w_6*y_6) / (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6) \quad (2)$$

$$y_i = \omega_{ij} \cdot MF_{ij}(x_i), \quad (3)$$

где ω_{ij} - вес j - го терма i - й лингвистической переменной;
 $MF_i(x_j)$ - функция принадлежности ij - го терма в формуле (3);
 x_i - численное значение i - й лингвистической переменной.

Расчет по формулам (2) и (3) осуществляется в нейронных функционалах второго и третьего открытых слоев, модель которых приведена на рисунках 9 и 10. Во втором слое осуществляется расчет по формуле (3), а в третьем открытом слое расчет осуществляется по формуле (2). Нейронный расчет осуществляется в два акта. Первый акт представлен рисунком 10.

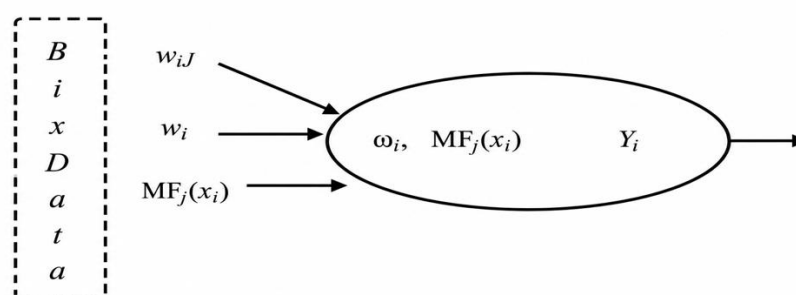


Рисунок 10 – Нейронная модель второго открытого слоя нечеткого расчета

В приведенной модели (рис.9) на ее вход поступает информация из Big Data: $\{w_{ij}\}$; $\{w_i\}$; $\{MF_{ij}(x_i)\}$.

Второй акт расчета представлен рисунком 11.

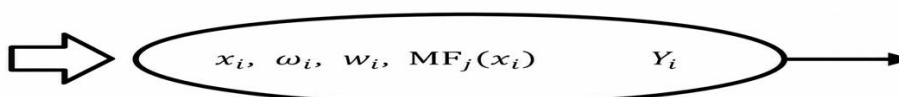


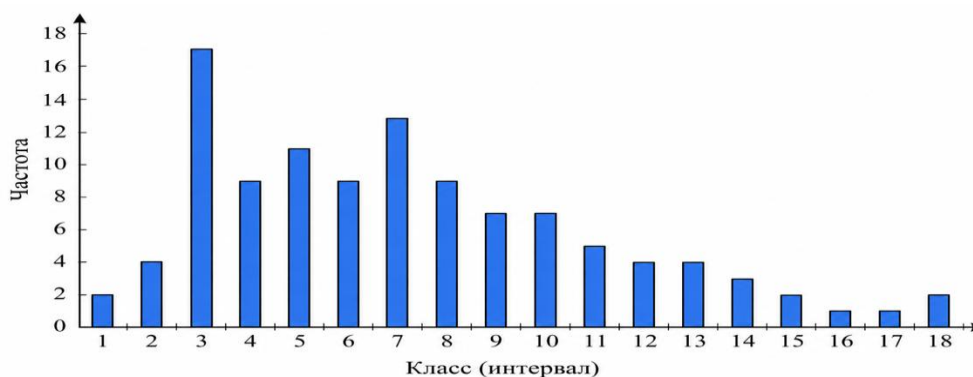
Рисунок 11 – Нейронная модель второго открытого слоя нечеткого расчета

Важное значение, и также мало изученным в новых условиях цифровой трансформации, приобретает система обучения и переквалификации персонала агроинжиниринга в условиях ОХМК. Эксплуатация технологической техники (трактора, комбайны, автомобили, краны) осуществляется в достаточно тяжелых погодных, рельефных и климатических условиях. В данных условиях кроме профессионального уровня работника проявляет себя, так называемый «человеческий фактор», где решающую роль играет «психотип человека». Эти обстоятельства являются крайне важными, представляют большой научно-практический интерес, требуют специального исследования, и в объеме настоящей работы не рассматриваются. В научно-методической

концепции адаптации персонала к требованиям настоящих digital - решений ОХМК, исследуется и эксплуатируется гипотеза подхода к системно-методическим процессам обучения водителей, машинистов-операторов и т.д., как к интегрированной системе менеджмента качества (ИСМК) на базе стандарта ISO 31010.

Для кормления крупного рогатого скота в ОХМК используют корма растительного и животного происхождения. Качество корма в мире принято оценивать его питательностью и энергетическими свойствами. Количество питательных веществ, необходимое животным для нормального развития, здоровья и обеспечения высокой продуктивности «кормовые нормы» рассчитываются в кормовых единицах, где 1 кг корма соответствует некоторому количеству кормовых единиц [1]. В ОХМК среди различных кормов ключевое значение имеют два основных вида - силос и сенаж. Среди полезных ингредиентов, содержащихся в силосе, по своей биологической и энергетической значимости в первую очередь следует выделить «Сырой Протеин» и «Сухое вещество». Поэтому, в качестве примера статистического анализа данных кормопроизводства рассматриваются сырой протеин и сухое вещество.

Первым этапом данные за исторический период, начиная с 2020 г, агрегируются в локальный массив, а затем следует типовая обработка с целью выявления основных статистических характеристик, а также закона распределения. Для выявления закона распределения строится эмпирическая гистограмма, представленная на рисунке 12. Визуальный предварительный анализ данной гистограммы позволяет выдвинуть гипотезу о законе распределения, который наиболее адекватно будет аппроксимировать эмпирические данные. Наиболее близкой теоретической аппроксимацией эмпирических данных в качестве нулевой гипотезы, если исходить из визуального анализа рисунка 12, следует считать закон Вейбулла.



-среднее квадратическое отклонение $\sigma = 0.5$;

- среднее арифметическое $X_{cp} = 7.5$.

Рисунок 12 – Эмпирическое распределение сырого протеина в силосе

Функция теоретической плотности распределения закона Вейбулла имеет следующий вид:

$$f(S, \beta, \gamma) = \frac{\beta}{\gamma} (S - \gamma)^{\beta-1} e^{-\frac{(S-\gamma)^\beta}{\beta}}, \quad S \geq \gamma, \quad (4)$$

где α - параметр масштаба;

β - параметр формы;

γ - параметр положения.

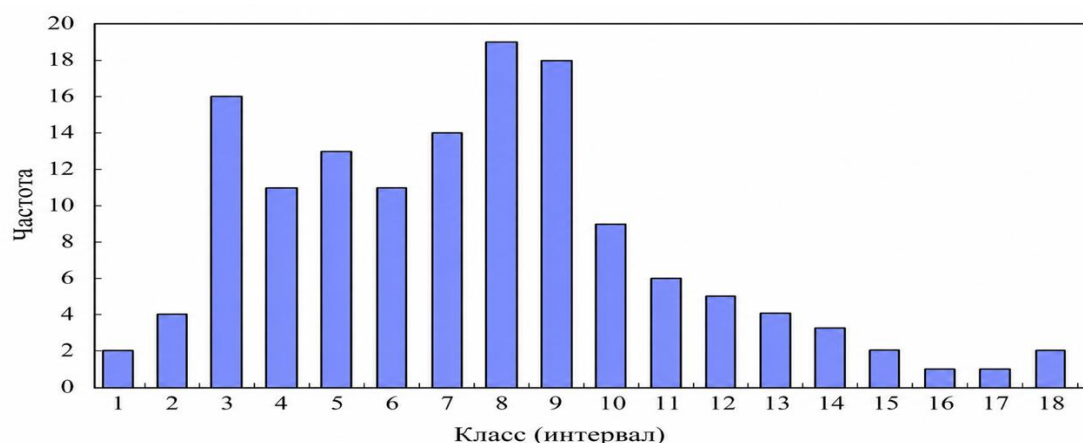
Закон Вейбулла привлекателен в моделирования тем, что имеет аналитическую форму интегрального закона распределения, которая имеет вид:

$$F(X) = 1 - e^{-\frac{(X-\gamma)^{\beta}}{\delta}} \quad (5)$$

Проверка гипотезы о теоретическом законе Вейбулла была проведена при следующих параметрических данных: параметр положения $\gamma = 6.0$, параметра формы $\beta = 2.5$, параметр масштаба $\alpha = 1.0$.

Аппроксимация эмпирического распределения теоретическим законом Вейбулла, при указанных параметрах показала, что гипотеза о данном законе распределения по критерию Пирсона с доверительной вероятностью 0.95 не отвергается.

Вторым контролируемым агентом в комбикорме является «сухое вещество» (СВ). Исследуя данные лабораторных наблюдений, были выявлены основные статистические характеристики контролируемого показателя и построена эмпирическая гистограмма распределения содержания СВ в силосе, которое наблюдалось в течении годичного периода в ОХМК (рис.13).



где: среднее значение равно 30кг; среднее квадратическое равно 2.0кг.

Рисунок 13 – Эмпирическое распределение сухого вещества (у) в силосе КРС

Аналитическое выражение функции теоретической плотности распределения сухого вещества (у) в силосе имеет следующий вид:

$$f_y(y) = \frac{1}{2.0\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-30)^2}{8}}, \quad (6)$$

σ_y - среднее квадратическое отклонение равно 2.0;

Y_{cp} - среднее значение равно 30.

Следующим этапом исследования предусматривается, при известных статистических характеристиках контролируемых параметров, оценить количественно риски производителя и риски потребителя. Для этой цели был использован программный продукт [8]. На базе, приведенных выше статистических материалов и указанного программного приложения, путем компьютерного моделирования, были рассчитаны количественные оценки рисков производителя и потребителя в вероятностном формате. Результаты компьютерного моделирования с целью дальнейшего предиктивного контроля и прогнозирования рисков в системе кормопроизводства для КРС на примерах силоса и сенажа приведены в таблицах 5 - 6.

Таблица 5 – Результаты компьютерного моделирования в оценивании рисков контроля сырого протеина в силосе для КРС

Относительная неопределенность (σ_f/σ_x)	Риск контроля сырого протеина в силосе, %			
	$X_{\Pi} = X_{cp} \pm \sigma_x$		$X_{\Pi} = X_{cp} \pm 2\sigma_x$	
	$P_{лб}$	$P_{нб}$	$P_{лб}$	$P_{нб}$
0.2	5	2	2	4
0.4	12	4	5	7
0.6	16	8	9	10
0.8	21	9	13	13
1.0	29	12	18	16

Таблица 6 – Результаты компьютерного моделирования в оценивании рисков контроля содержания сухого вещества в силосе для КРС

Относительная неопределенность (σ_y/σ_y)	Риск контроля сухого вещества в силосе, %			
	$Y_{\Pi} = Y_{cp} \pm \sigma_y$		$Y_{\Pi} = Y_{cp} \pm 2\sigma_y$	
	$P_{лб}$	$P_{нб}$	$P_{лб}$	$P_{нб}$
0.2	3	1	2	3
0.4	9	3	4	6
0.6	13	6	8	9
0.8	18	9	11	12
1.0	22	13	17	15

Статистические исследования сенажа на предмет контроля рисков производителя и рисков потребителя осуществляются по методике аналогичной силосу.

Результаты моделирования, приведенные в таблицах 5-6 показывают, что при одинаковых входных статистических и метрологических показателях (неопределенностях) риски производителя ($P_{лб}$) и риски потребителя ($P_{нб}$) количественно отличаются почти в два раза, что имеет крайне важное значение в оценке качества конечного молочного продукта.

Заключение.

Из результатов компьютерного моделирования следует, что контроль на примере кормопроизводства представляет сложную многопараметрическую стохастически-программируемую композицию. В данной композиции результативно интегрируются: статистические параметры и законы распределения измеряемой (контролируемой) величины, статистические параметры и законы распределения погрешности (неопределенности) измерения, величина норматива, которые являются информационной базой для управления рисками агроинжиниринга. Статистические характеристики агентов управления в реальном технологическом процессе кормопроизводства относятся к прецедентным явлениям, на которых строится цифровой двойник. Ежегодные новые производственные показатели ОХМК, после проверки на статистическую однородность, пополняют базу «исторических» данных в системе «больших данных», и модель модифицируется, адаптируясь к новой информационной обстановке, что обеспечивает «обучение» системы.

Список литературы

1. Trujillo, F., Pozo, M., & Suntaxi, G. (2025). Artificial intelligence in education: A systematic literature review of machine learning approaches in student career prediction. *Journal of Technology and Science Education*, 15(1), 162-185. <https://doi.org/10.3926/jotse.3124>

2. Zayed, Y., Salman, Y., & Hasasneh, A. (2022). A Recommendation System for Selecting the Appropriate Undergraduate Program at Higher Education Institutions Using Graduate Student Data. *Applied Sciences*, 12(24), 12525. <https://doi.org/10.3390/app122412525>
3. Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ. Computer science*, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
4. Gunawardana, A., & Shani, G. (2009). A Survey of Accuracy Evaluation Metrics of Recommendation Tasks. *Journal of Machine Learning Research*, 10(100), 2935–2962. <https://jmlr.csail.mit.edu/papers/volume10/gunawardana09a/gunawardana09a.pdf>
5. Matthew J. Page, Joanne E. McKenzie, Patrick M. Bossuyt, et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
6. Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering (EBSE Technical Report EBSE-2007-01). Keele University and Durham University Joint Report.
7. Mahboob K, Asif R, Haider N. (2024). Career planning matters: Intelligence-based career path predictions using data mining models - A longitudinal study. *MEHRAN UNIVERSITY RESEARCH JOURNAL OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY*.43(4):192-213. doi:10.22581/muet1982.3343.
8. Gülten, H., & Baraçlı, H. (2024). A Machine Learning-Based Forecast Model for Career Planning in Human Resource Management: A Case Study of the Turkish Post Corporation. *Applied Sciences*, 14(15), 6679. <https://doi.org/10.3390/app14156679>
9. Fatima N, Gul S, Ahmed J, Khand Z, Mujtaba G. (2022). A rule-based machine learning model for career selection through MBTI personality. *MEHRAN UNIVERSITY RESEARCH JOURNAL OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY*. 41(2):185-196. doi:10.22581/muet1982.2202.18.
10. Cheng Y. (2025). Development of a Career Planning Assistance Platform for College Students Combining Fuzzy Logic and Deep Learning. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*. 29(3):445-455. doi:10.20965/jaciii. 2025.p0445.

АГРОИНЖЕНЕРИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССТЕРІНІҢ ЦИФРЛЫҚ ЖЕТІЛУІН САПАЛЫҚ БАҒАЛАУ ӘДІСІН ӘЗІРЛЕУ

Аннотация. Бұл зерттеудің мақсаты - Шығыс Қазақстанда мал азығын өндіруге арналған ауыл шаруашылығы инженериясының сапасын жақсарту. Қазақстанның ауыл шаруашылығы өндірісі жоғары тәуекелді аймақ болып саналады, сондықтан ауыл шаруашылығы өнімдерін өндірушілер мен тұтынушылардың тәуекелдері ауыл шаруашылығы инженериясының сапасының негізгі критерийлері ретінде қолданылады. Бұл міндеттерді осы ғылыми және өндірістік контексте жүзеге асыру, әсіресе аймақтық табиғи, климаттық және географиялық аспектілер тұрғысынан тақырыптық саланың ғылыми тұрғыдан жеткіліксіз зерттелуіне байланысты ерекше қиын. Қазіргі заманғы цифрлық өндірісті басқару жүйелерінде проактивті мониторинг және бақылау өте маңызды. Бұл зерттеу басқаруды ауыл шаруашылығы инженерия жүйесіне айналдыратын жаңа тәсілді зерттейді, онда тәуекелдер бизнес ортасының цифрлық жетілу критерийлері ретінде қарастырылады. Мал шаруашылығында жем сапасы маңызды рөл атқарады, ал жем өндірісінің барлық кезеңдерінде заманауи цифрлық шешімдерді пайдаланбай оны бақылау мүмкін емес. Интегралдық және дифференциалдық форматтардағы сандық жетілу критерийлеріне негізделген басқару процестерін сапалы бағалау үшін бұл мақалада шешім қабылдау сапасын жақсартатын айқын емес басқару агенттерінің принциптеріне негізделген жаңа модель ұсынылады.

Түйін сөздер: ауылшаруашылық инженериясы, жем өндірісі, тәуекел, сандық жетілу, бақылау, модель.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR QUALITICAL ASSESSMENT OF THE DIGITAL MATURITY OF AGROENGINEERING BUSINESS PROCESSES

Abstract. The objective of this study is to improve the quality of agricultural engineering for cattle feed production in Eastern Kazakhstan. Kazakhstan's agricultural production is considered a high-risk area, and therefore, producer and consumer risks of agricultural products are used as key criteria for agricultural engineering quality. Implementing these tasks in this scientific and production context is particularly challenging due to the insufficient scientific study of the subject area, particularly in terms of regional natural, climatic, and geographic aspects. In modern digital production management systems, proactive monitoring and control are crucial. This study explores a new approach that transforms management into an agricultural engineering system, in which risks are considered as criteria for the digital maturity of the business environment. In livestock farming, feed quality plays a crucial role, and monitoring it is impossible without the use of modern digital solutions at all stages of feed production. To qualitatively evaluate control processes based on digital maturity criteria in both integral and differential formats, this paper proposes a new model based on the principles of fuzzy control agents, which improves the quality of decision-making.

Keywords: agricultural engineering, feed production, risk, digital maturity, control, model.

Авторлар туралы мәлімет

Абитаев Фарид Кумашевич	8D07106 – Автоматтандыру және басқару білім беру бағдарламасының докторанты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті; Өскемен қ., Қазақстан, E-mail: ohmk7@mail.ru
Азаматов Бағдат Нурланович	PhD, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан, Email: azamatovy@mail.ru
Корнев Вячеслав Андреевич	т.ғ.к., доцент., Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан E-mail: kornev_01.01@mail.ru
Алибекқызы Карлыгаш	PhD, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан, E-mail: karlygash.alibekkyzy@mail.ru
Жанбосинов Рустам Ерланович	8D07105 – Жылуэнергетика білім беру бағдарламасының докторанты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті; Өскемен қ., Қазақстан, E-mail: rustam.zhanbossinov@gmail.com

Сведение об авторах

Абитаев Фарид Кумашевич	Докторант образовательной программы 8D07106 – Автоматизация и управление, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан, E-mail: ohmk7@mail.ru
Азаматов Бағдат Нурланович	PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан, Email: azamatovy@mail.ru
Корнев Вячеслав Андреевич	к.т.н., доцент., Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан, E-mail: kornev_01.01@mail.ru
Алибекқызы Карлыгаш	PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан, E-mail: karlygash.alibekkyzy@mail.ru
Жанбосинов Рустам Ерланович	Докторант образовательной программы 8D07105 – Теплоэнергетика, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан, E-mail: rustam.zhanbossinov@gmail.com

Information about authors

Abitaev Farid	PhD student of the educational program 8D07106 - Automation and control, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: ohmk7@mail.ru
Azamatov Bagat	PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: azamatovy@mail.ru
Kornev Vyacheslav	c.t.s., associate professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: kornev_01.01@mail.ru
Alibekkyzy Karlygash	PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: karlygash.alibekkyzy@mail.ru
Zhanbosinov Rustam	PhD student of the educational program 8D07105 - Thermal power engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan E-mail: rustam.zhanbossinov@gmail.com



ӘОЖ 004.932.4

ҒТАХА 28.23.15

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_13

Д.Ж.Кайбасова¹, А.Ш.Сұлтан^{1*}
¹Astana IT University, Астана, Қазақстан

*E-mail: 255734@astanait.edu.kz

БЕЙНЕЛЕРДЕГІ ШУЛАРДЫ БАСУ ӘДІСТЕРІ: ҚАЛДЫҚТАРДЫ СҰРЫПТАУДЫҢ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ НЫСАНДАРДЫ ТАҢУ ДӘЛДІГІН АРТТЫРУ

Аңдатпа. Нысандарды автоматтандырылған тану жүйелері өнеркәсіпте, робототехникада және экологиялық мониторингте кеңінен қолданылады, ал қалдықтарды сұрыптаудың интеллектуалды жүйелері аталған салалардың ішіндегі ең өзекті бағыттардың бірі болып табылады. Дегенмен, кескіндерді алдын ала өңдеу сапасы, әсіресе шуды басу кезеңі, тану дәлдігіне тікелей әсер ететіндігіне қарамастан, әдебиетте қалдықтарды сұрыптау контекстіндегі әр түрлі шудан азайту әдістерінің жүйелі салыстырмалы талдауы жеткіліксіз қарастырылған. Бұл пилоттық зерттеуде аталған олқылықтың орнын толтыруға бағытталған бастанқы қадам ретінде кескіндерді шуылдан тазартудың алты түрлі әдісі бірыңғай эксперименттік тәжірибеде салыстырылды: Гаусс сүзгісі, медиана сүзгісі, шекараларды бейімді сақтаумен гибриді әдіс, модификацияланған бейімді медиана сүзгісі (AMF+MDBMF) және алдын ала оқытусыз DnCNN нейрожелілік әдісі. Тәжірибелік база Kaggle TrashNet деректер жиынтығынан үш сыныпты (пластик, шыны, металл) қамтитын 15 репрезентативті түрлі-түсті бейнеден тұрды. Үш түрлі шуыл жасанды түрде қосылды: Гаусс шуылы ($\sigma = 25$), «тұз бен бұрыш» импульстік шуылы ($p = 5\%$) және Пуассон шуылы. Сапаны бағалау үшін бес метрика (PSNR, SSIM, MSE, MAE, EPI) және параметрлік емес статистикалық маңыздылық сынақтары (Уилкоксон белгілі рангтер сынағы, Коэн d коэффициенті) қолданылды. Қосымша, әдістердің есептеу күрделілігі (өңдеу уақыты) өлшенді. Нәтижелер медиана сүзгісінің барлық шуыл түрлерінде статистикалық маңызды артықшылықпен ($p < 0,01$) ең жоғары тиімділікті көрсеткенін дәлелдеді. Каскадты AMF+MDBMF әдісі импульстік шуылда жоғары тиімділікті көрсетті. Алдын ала оқытылмаған DnCNN нейрожелісі негативті нәтиже берді, бұл нейрожелілік модельдерді алдын ала оқытудың міндеттілігін растайды. Зерттеудің ғылыми жаңалығы – TrashNet деректер жиынтығында үш классқа жататын денойзинг әдістерін бірыңғай эксперименттік протоколда салыстыру әдіснамасын әзірлеуде. Алынған пилоттық нәтижелер қалдықтарды сұрыптаудың автоматтандырылған жүйелерінің алдын ала өңдеу блогын жобалау кезінде бағдар бере алады және болашақта толық TrashNet деректер жиынында (2527 бейне) кеңейтілуі тиіс.

Түйін сөздер: бейнелерді шуылдан тазарту, Гаусс шуылы, импульстік шуыл, нысандарды тану, медиана сүзгісі, гибриді сүзгілеу әдістері, статистикалық маңыздылық, PSNR, SSIM, TrashNet.

Кіріспе.

Компьютерлік көру медициналық бейнелеу, қауіпсіздік жүйелері, өнеркәсіптік ортадағы сапаны бақылау және автономды робототехника сияқты салаларға терең енген [1, 2]. Осы бағыттардың арасында қатты тұрмыстық қалдықтарды автоматтандырылған сұрыптау соңғы жылдары экологиялық міндеттердің күшеюіне және циркулярлық экономика концепциясының дамуына байланысты ерекше өзектілікке ие болды [3, 4, 5, 6]. Пластикалық бөтелкелерді, металл банкаларды және шыны ыдыстарды нақты уақыт режимінде ажырата алатын интеллектуалды жүйелер өндіріске жаппай енгізілуде, бірақ олардың сапасы кіріс деректерінің, яғни цифрлық кескіндердің сапасына тікелей тәуелді.

Іс жүзінде өнеркәсіптік шарттарда алынған кескіндер мінсіз болмайды. Конвейер таспасының діріл, біркелкі емес жарықтандыру, сенсорда жинақталған шаң, төмен жарық кезінде ISO мәнінің артуы және деректерді беру кезіндегі артефактілер – осының барлығы кескіндегі шуылдың пайда болуына әкеледі [7, 8]. Шуылдың болуы кейінгі классификация дәлдігін айтарлықтай төмендетеді: тіпті заманауи терең конволюциялық желілер (CNN) шумен бұрмаланған кескіндерді өңдегенде 10–25%-ға қателесуі мүмкін [9, 10]. Осы себептен шуды басу (image denoising) қазіргі заманғы компьютерлік көру жүйелерінде маңызды алдын ала өңдеу кезеңі болып табылады.

Цифрлық кескіндердегі шуылды пайда болу себептері мен статистикалық сипаттамаларына байланысты үш негізгі түрге бөлуге болады [7, 11, 12]. **Гаусс шуылы** камера сенсорындағы электрондық шуылдың салдары болып табылады; ол қалыпты үлестірімге ие және төмен жарық немесе жоғары ISO мәндерінде күшейеді. **«Түз бен бұрыш»** импульстік шуылы кездейсоқ қара және ақ нүктелер түрінде көрінеді, яғни бұл сенсордың зақымдалу немесе деректерді беру қателіктерінің салдары. **Пуассон шуылы** жарықтың кванттық табиғатынан туындайды: жарықтығы жоғары аймақтарда шуыл қарқынды болады, бұл өнеркәсіптік камераларда жиі кездеседі [12].

Әдебиеттерге шолу.

Соңғы жылдары кескіндерді шуылдан тазарту бойынша зерттеулерді шартты түрде үш бағытқа бөлуге болады. *Бірінші бағыт:* классикалық кеңістіктік сүзгілерді (Гаусс, медиана, орташа, билатеральды) жетілдіру. Кауг және басқалар [7] жүргізген кешенді шолу классикалық сүзгілердің есептеу тиімділігі жоғары болғанымен, шуылдың әр түрі үшін бөлек реттеуді қажет ететіндігін көрсетеді. Sun [13] медиана мен орташа сүзгілердің Гаусс шуылындағы тиімділігін салыстырып, медиана сүзгісінің артықшылығын дәлелдеді, бірақ зерттеу тек бір шу түріне және синтетикалық қарапайым кескіндерге шектелген.

Екінші бағыт: бейімделгіш және гибриді әдістерді әзірлеу. Ullah және басқалар [11] AMF+MDBMF каскадтық сүзгісін ұсынды, ол импульстік шуыл тығыздығы 90%-ға дейін жеткенде де кескінді қалпына келтіруге қабілетті. Алайда автормен жүргізілген тәжірибелер тек медициналық кескіндерде орындалған, сонымен қатар Гаусс және Пуассон шуылдары талданбаған. Abdul Wadood пен Ghalib [14] бейсызықтық сүзгілерді астрономиялық кескіндерде салыстырды, бірақ нәтижелерді қалдықтарды сұрыптау контекстіне көшіру мүмкін емес, өйткені деректер сипаты түбегейлі ерекшеленеді.

Үшінші бағыт: терең оқытуға негізделген әдістер. Tian және басқалар [12], Elad және басқалар [10], Izadi және басқалар [9] жасаған шолулар DnCNN, FFDNet, Restormer сияқты заманауи нейрожелілік модельдердің PSNR метрикасы бойынша классикалық әдістерден 2–4 дБ-ға жоғары тиімділік көрсететінін дәлелдейді. Алайда бұл нәтижелер ірі көлемді жалпы мақсаттағы деректер жиындарында (BSD500, Set12, Urban100) алынған, сонымен қатар тиісті алдын ала оқытуды қажет етеді. Қалдықтарды сұрыптау бойынша жұмыстарда [2, 3, 4, 5, 6] негізінен классификациялық бөлік (YOLO, ResNet, EfficientNet) талданады, ал шуды басу қадамы егжей-тегжейлі қарастырылмайды немесе тек бір ғана сүзгі қолданылады.

Аталған әдебиеттерге шолудан мынадай олқылықтарды анықтауға болады: (1) қалдықтарды сұрыптау бойынша деректер жиынында (TrashNet) денойзинг әдістерінің

жүйелі салыстырмалы талдауы жоқ; (2) көптеген зерттеулер тек бір шу түрі бойынша орындалған, ал нақты өнеркәсіптік шарттарда бірнеше шу түрі бір мезгілде кездеседі; (3) шуды басу әдістерінің есептеу күрделілігі мен олардың кейінгі классификация дәлдігіне әсері бір зерттеу аясында сирек қарастырылады; (4) сапаны бағалау тек метрикалардың орташа мәндерімен шектеледі, статистикалық маңыздылық тестілері (Уилкоксон сынағы, Коэн d) сирек қолданылады.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы келесіде:

1) қалдықтарды сұрыптау контекстіндегі денойзинг әдістерін салыстырудың бірыңғай эксперименттік протоколы әзірленді, ол үш түрлі шу түрін (Гаусс, импульстік, Пуассон), әр түрлі әдіс кластарын (классикалық, гибридті, нейрожелілік) және сапаны бағалаудың бес метрикасын біріктіреді;

2) бірінші рет TrashNet деректер жиынында 15 кескіннен тұратын репрезентативті таңдамада денойзинг әдістерінің тиімділігінің статистикалық маңыздылығы Уилкоксонның белгілі рангтер сынағы және Коэн d коэффициенті көмегімен бағаланды (пилоттық дизайн);

3) шуылдан тазарту әдістерінің есептеу күрделілігі (бір кескінді өңдеу уақыты) және олардың MobileNetV2 классификаторының дәлдігіне әсері бір зерттеу аясында бағаланды, бұл әдісті тәжірибеде таңдау бойынша негізделген ұсыныстар жасауға мүмкіндік береді.

Зерттеудің мақсаты – қайта өңделетін қалдықтардың кескіндерінде шуды басудың алты әдісінің тиімділігін салыстырмалы бағалау және әр түрлі шу түрлері үшін ең тиімді әдісті статистикалық маңыздылықпен анықтау. Қойылған міндеттер: (а) деректер жиынын дайындау және үш түрлі шуылды бақыланатын параметрлермен қосу; (б) алты сүзу әдісін бірыңғай протоколда жүзеге асыру және сынау; (в) сапа метрикалары бойынша нәтижелерді статистикалық талдау; (г) есептеу күрделілігі мен классификация дәлдігіне әсерін бағалау; (д) тәжірибелік қолдану үшін ұсыныстар жасау.

Зерттеу материалдары мен әдістері.

Тәжірибелік деректер жиынтығы

Тәжірибелер үшін жалпыға қолжетімді Kaggle TrashNet деректер жиынтығынан [3] үш сыныпты қамтитын 15 репрезентативті түрлі-түсті бейне таңдалды: пластик (500 бейне), шыны (500 бейне) және металл (500 бейне). Бұл пилоттық эксперимент болып табылады; шектеулі тарихи мысал ретінде толық деректер жиыны (2527 бейне) бойынша кеңейту болашақ зерттеулердің мақсаты болып табылады. Кескіндердің рұқсаттылығы 512×384 пиксель, JPEG форматында, RGB түс кеңістігінде. Кескіндер бақыланатын жарықтандыру жағдайларында, біркелкі ақ фонда түсірілген, бұл шуды басу әдістерінің таза қасиеттерін бағалауға мүмкіндік береді, яғни таза кескіндер референс ретінде қызмет етеді. Шағын бірақ сапалы бақыланатын таңдама әдістерді сапалық тұрғыдан ажыратуға және алдағы үлкен ауқымды зерттеулер үшін бағыт беруге жеткілікті.

Зерттеліп отырған сүзгілеу әдістеріне шолу

Зерттеуде үш әр түрлі сынып әдістеріне жататын алты сүзу әдісі іске асырылды: классикалық кеңістіктік сүзгілер (Гаусс, медиана), бейімделгіш және гибридті әдістер (адаптивті жиекті сақтайтын гибрид, AMF+MDBMF), терең оқытуға негізделген тәсіл (DnCNN). Барлық әдістер OpenCV 4.8.1, scikit-image 0.21.0 және PyTorch 2.0.1 кітапханалары арқылы Python 3.10 ортасында жүзеге асырылды.

Гаусс сүзгісі – сызықтық төмен жиілікті сүзгі. Кескін Гаусс сүзгісі (қалыпты үлестірілген) арқылы оралады, бұл орталыққа жақын орналасқан пикселдерге үлкен салмақ береді. Гаусс сүзгісі көбінесе шуды азайту үшін екі өлшемді сигналдарды (кескіндерді) өңдеу үшін сандық түрде қолданылады. Бұл сүзгі Гаусс шуды жоятын сызықтық тегістеу әсеріне ие және кескінді өңдеуде шуды азайтуда кеңінен қолданылады. Екі өлшемді Гаусс ядросы (1) өрнегімен анықталады [7, 14]:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

мұндағы x және y – орталық ядродан көлденең және тік қашықтықтар, σ – тегістеу деңгейін анықтайтын стандартты ауытқу.

Эксперименттерде ядро өлшемі 5×5 , $\sigma = 1,0$ қолданылды. Бұл әдіс Гаусс шуын жоюда тиімді, бірақ шекаралар мен ұсақ бөлшектерді бұлдырлайды; импульстік шуылға іс жүзінде тиімсіз. Уақыттық күрделілігі: $O(N \cdot k^2)$, мұндағы N – пиксельдер саны, k – ядро өлшемі [13, 14].

Медиана сүзгісі – бұл орташа мәнді пайдаланбайтын сызықтық емес сүзгі, оның орнына әрбір пиксель сүзгі терезесіндегі барлық пикселдердің медианасымен ауыстырылады, бұл (2) теңдеуінде көрсетілген [7]:

$$\hat{f}(x, y) = \text{median}\{g(r, c) | (r, c) \in S_{xy}\} \quad (2)$$

мұндағы $S_{xy} - (x, y)$ нүктесінде орналасқан сүзгілеу терезесі. (x, y) нүктесіндегі пиксель мәні медиана есептеуіне де кіреді.

Медиана сүзгісінде терезе пішіні міндетті түрде шаршы болуы міндетті емес, арнайы сүзгі пішіндері кескіндегі сызықтық құрылымдар мен жиектерді сақтай алады, бұл оларды жобалау мен енгізуді күрделі етеді. Тәжірибелерде квадрат терезе 3×3 қолданылды. Медиана сүзгісі рангтік сүзгілер класының жеке жағдайы болып табылады және импульстік шуыл («тұз бен бұрыш») жағдайында ерекше тиімді, өйткені экстремалды мәндер (0 және 255) орташалау есебіне кіреді, бірақ медиана мәнін анықтамайды. Бұл сүзгі орталық пиксельдің мәнін көршілерінің реттелген тізбегінен алынған мәнмен ауыстырады. r ретті рангтік сүзгі ($1 \leq r \leq N$, мұндағы N – көршілес элементтер саны) алынған тізбектен r индексі бар элементті таңдайды және оның мәнін бастапқы кескіннің сүзілген пиксель мәні ретінде тағайындайды. Уақыттық күрделілігі: $O(N \cdot k^2 \cdot \log k)$.

Адаптивті жиекті сақтайтын гибриді әдіс – Гаусс және медианалық сүзгілердің салмақтық қосындысына негізделген әдіс [13, 14]. Әрбір пиксель үшін жергілікті градиент шамасы есептеледі, оның негізінде салмақ коэффициенті анықталады:

$$\hat{f}_{\text{hybrid}(x,y)} = w(x, y) * f_{\text{median}(x,y)} + (1 - w(x, y)) * f_{\text{gauss}(x,y)} \quad (3)$$

мұндағы $w(x, y) \in [0, 1]$ – Собель операторымен есептелген жергілікті градиент шамасына тең. Жиектерде (жоғары градиент) медианалық бөлік басым, ал біркелкі аймақтарда – Гаусс. Тәжірибелерде Гаусс компоненті үшін ядро 5×5 , $\sigma = 1,0$, медиана компоненті үшін терезе 3×3 қолданылды. Бұл әдіс екі сүзгінің артықшылықтарын біріктіреді: біркелкі шуды тегістейді және шекараларды сақтайды.

AMF+MDBMF каскадтық әдісі – Ullah және басқалардың [11] жұмысы бойынша іске асырылған екі сатылы әдіс. Бірінші саты – Adaptive Median Filter (AMF): пиксель мәні (0 немесе 255) жергілікті экстремум деп есептелсе, терезе өлшемі ұлғайтылады (3×3 -тен бастап 7×7 -ге дейін), әйтпесе медиана арқылы ауыстырылады. Екінші саты – Modified Decision-Based Median Filter (MDBMF): тек бірінші сатыда зақымдалған деп белгіленген пикселдер ғана өзгертіледі; егер пиксель экстремум болмаса, ол өзгеріссіз қалады. Бұл селективтілік таза аймақтарда қажетсіз тегістеуді жояды және импульстік шу тығыздығы жоғары болғанда да тиімді. Алгоритмдік қадамдар:

– 1-қадам: әр пиксель үшін S_{xy} терезесінде минимум, максимум және медиана есептелсін;

– 2-қадам: егер ағымдағы пиксель мәні ($\min$, $\max$) аралығында болса, ол шусыз деп есептеледі;

– 3-қадам: әйтпесе пиксель медианамен ауыстырылады; егер медиана да экстремум болса, терезе ұлғайтылады;

– 4-қадам: MDBMF-те қосымша шу карта (binary noise mask) пайдаланылады

DnCNN (алдын ала оқытусыз) – Zhang және басқалар ұсынған конволюциялық нейрондық желі [12, 15]. Архитектура 17 конволюциялық қабаттан тұрады (3×3 ядро, 64 сүзгі, ReLU активациясы, Batch Normalization), қалдық оқытуға (residual learning) негізделген: модель таза кескінді емес, шу компонентін болжайды, ол кейін шулы кескіннен алынады. Зерттеуде модель әдейі алдын ала оқытусыз қолданылды – бұл компоненттің бар-жоғы тиімді нейрожелілік шуды басу үшін жеткіліксіз екенін көрсету мақсатында жасалды. Бұл шешім практикалық тұрғыдан маңызды: көптеген қолданбалы инженерлер дайын модельдерді тиісті тюнингсіз пайдалануға тырысады, ал біздің тәжірибе мұндай тәсілдің қауіптерін көрнекі көрсетеді.

Қалпына келтіру сапасын бағалау көрсеткіштері

Шуды азайтудан кейін кескінді қалпына келтіру сапасын сандық бағалау үшін бес көрсеткіш пайдаланылды, олардың әрқайсысы нәтиженің әртүрлі аспектілерін көрсетеді [16, 17].

PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*) – децибелмен өлшенетін және әдетте логарифмдік шкала бойынша өрнектелетін сигнал-шу қатынасының шыңы. Ол түпнұсқа және қалпына келтірілген кескіндер арасындағы айырмашылық дәрежесін сандық түрде анықтайды. PSNR мәндерінің жоғары болуы қалпына келтіру сапасының жақсырақ екенін көрсетеді [16]:

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left(\frac{MAX_1^2}{MSE} \right) \quad (4)$$

мұндағы MAX_1^2 – пиксельдің максималды мүмкін мәні (мысалы, 8 биттік кескіндер үшін 255);

MSE – орташа квадраттық қате.

SSIM (*Structural Similarity Index*) – құрылымдық ұқсастық индексі (0-ден 1-ге дейін), пиксель деңгейіндегі айырмашылықтардан асып түседі және жарықтықты, контрастты және құрылымды ескереді. Бұл кескін сапасын бағалау метрикасы адамның қабылдауын имитациялайды және PSNR-ден айырмашылығы, SSIM кескіннің құрылымдық ерекшеліктерін ескереді [16]:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (5)$$

мұндағы $\mu_x\mu_y$ – кескіннің орташа мәні, σ_x^2 , σ_y^2 – дисперсия, σ_{xy} – ковариация, C_1 , C_2 – тұрақтандырушы тұрақтылар.

MSE (*Mean Squared Error*) – түпнұсқа және қалпына келтірілген кескіндердің пиксельдері арасындағы квадраттық ауытқулардың орташа мәнін сипаттайды, орташа квадраттық қателік үлкен ауытқуларға да сезімтал келеді [17]:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - K_i)^2 \quad (6)$$

мұндағы I_i – түпнұсқа кескіннің пиксель мәні, K_i – өңделген пиксельдің кескін мәні, N – пиксельдердің жалпы саны.

MAE (*Mean Absolute Error*) – барлық пиксельдер үшін орташа абсолютті қатені есептеуге негізделген түпнұсқа және өңделген кескіндер арасындағы айырмашылықты

бағалау әдісі, MSE-мен салыстырғанда ол ауытқуларға сезімталдығы төмен, модель болжамдарының шынайы мәндерден орташа абсолютті ауытқуын өлшейді [17]:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I_i - K_i| \quad (7)$$

мұндағы I_i , K_i , N – MSE-ге ұқсас.

Жиектерді сақтау индексі – бастапқы және өңделген кескіндердің Лаплас контурлық карталары арасындағы нормаланған корреляция ретінде есептелетін, нысандардың контурлары мен шекараларын сақтау үшін сүзу әдісінің мүмкіндігін бағалайтын метрика [17]:

$$EPI = \frac{\sum_i (\nabla I_i * \nabla K_i)}{\sum_i (\nabla I_i)^2} \quad (8)$$

мұндағы ∇I_i , ∇K_i – градиенттер (Собель операторы), I – бастапқы кескін, K – өңделген кескін.

Статистикалық талдау әдістері

Әдістер арасындағы айырмашылықтардың статистикалық маңыздылығын бағалау үшін *Уилкоксонның белгілі рангтер сынағы* (Wilcoxon signed-rank test) пайдаланылды. Бұл сынақ параметрлік емес болып табылады және метрикалардың қалыпты үлестірілуін талап етпейді, сонымен қатар шағын таңдамаларда ($N \geq 6$) сенімді жұмыс істейді [17], бұл біздің пилоттық зерттеудің контекстінде маңызды. Маңыздылық деңгейі $\alpha = 0,05$ ретінде белгіленді. Барлық p -мәндер 15 кескінге сәйкес келетін жұптасқан таңдамалар бойынша есептелді.

Эффект мөлшерін бағалау үшін Коэн d коэффициенті қолданылды:

$$d = \frac{(\mu_1 - \mu_2)}{\sigma_{pooled}}, \sigma_{pooled} = \sqrt{\frac{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}{2}} \quad (9)$$

мұндағы Cohen бойынша: $|d| < 0,2$ – кіші, $0,2 \leq |d| < 0,5$ – орташа, $0,5 \leq |d| < 0,8$ – үлкен, $|d| \geq 0,8$ – өте үлкен эффект. Коэн d коэффициенті таңдама көлеміне тәуелді емес, ол метрикалардың таралу аумағындағы айырмашылықты сипаттайды, бұл шағын таңдамалар үшін аса құнды.

Әр метрика үшін орташа мән $\pm$ стандартты ауытқу ($\mu \pm \sigma$) есептелді. *Пилоттық таңдама көлемінің шектеулерін мойындай отырып*, біз есептелген p -мәндер мен d -мәндерін болашақ кеңейтілген зерттеу үшін бағыт-бағдар ретінде қарастырамыз; нәтижелердің сенімділігі толық TrashNet деректер жиынында расталуы тиіс.

Эксперименттік орта.

Барлық эксперименттер келесі есептеу платформасында жүргізілді: процессор Intel Core i7-11800H (2.30 ГГц, 8 ядро), оперативті жады 16 ГБ DDR4, видеокарта NVIDIA RTX 3060 (6 ГБ GDDR6, CUDA 11.8). Бағдарламалық қамтамасыз ету: Windows 11, Python 3.10.12, OpenCV 4.8.1, scikit-image 0.21.0, NumPy 1.24.3, SciPy 1.11.1, PyTorch 2.0.1+cu118. Барлық уақыт өлшеулері `time.perf_counter()` функциясы арқылы орындалды, 10 қайталау бойынша орташа алынды.

Тәжірибелік деректер жиынтығы және шу шығару процедурасы.

Тәжірибелік деректер жиынтығы жалпыға қолжетімді Kaggle TrashNet жинағынан [3] алынған 15 түрлі-түсті кескіннен тұрды. Үш нысан санаты пайдаланылды: пластик, шыны және металл. Рұқсаттылық 512×384 пиксель болды, бақыланатын жарықтандыру жағдайларында түсірілген.

Әрбір кескін үш түрлі шумен нашарлатылды. Нәтижесінде барлығы 45 шулы кескін пайда болды ($15 \text{ түпнұсқа} \times 3 \text{ шу түрі}$).

1-суретте әртүрлі σ мәндері үшін Гаусс шуы көрсетілген (5, 25, 50). Негізгі тәжірибелер үшін $\sigma = 25$ өнеркәсіптік бейнелеу жағдайларын нақты жуықтау ретінде таңдалды.



1 сурет – Стандартты ауытқу параметрлері $\sigma = \{5, 25, 50\}$ болатын Гаусс шуы

2-суретте бастапқы мәні 5%-ға орнатылған, ықтималдығы 1%, 5% және 10% болатын «тұз бен бұрыш» шуы көрсетілген.



2 сурет – «Тұз бен бұрыш» импульстік шуы: $p = 1\%$ (әлсіз), $p = 5\%$ (орташа), $p = 10\%$ (күшті)

3-суретте орташа жарықтық аймақтарында айқын көрінетін, өзіне тән түйіршікті құрылымы бар Пуассон шуы көрсетілген.



3 сурет – Бастапқы кескін мен Пуассон шуы бар кескінді салыстыру

Барлық код OpenCV, NumPy және scikit-image көмегімен Python тілінде жазылған.

Нәтижелер және талқылау.

Барлық метрикалық мәндер деректер жиынындағы 15 сурет бойынша орташа мәндер болып табылады. PSNR және SSIM үшін $\mu \pm \sigma$ форматында берілген; MSE, MAE және EPI үшін орташа мәндер келтірілген (шағын таңдамада экстремум мәндерге сезімтал, дисперсияны түсіндіру қиын). 1, 2 және 3-кестелерде сәйкесінше Гаусс шуылы, импульстік шуыл және Пуассон шуылы үшін нәтижелер келтірілген.

1 кесте – Гаусс шуылын сүзу нәтижелері ($\sigma = 25$, $N = 15$, PSNR/SSIM: $\mu \pm \sigma$)

Әдіс	PSNR (дБ)	SSIM	MSE	MAE	EPI
Шулы кескін	$23,55 \pm 0,47$	$0,2774 \pm 0,043$	288,73	13,49	0,632
Гаусс	$30,70 \pm 1,04$	$0,8276 \pm 0,030$	56,86	5,53	0,765
Медиана	$31,68 \pm 1,03$	$0,8536 \pm 0,029$	45,36	5,00	0,832
Гибридті	$31,23 \pm 0,87$	$0,8448 \pm 0,028$	49,87	5,15	0,815
AMF+MDBMF	$29,18 \pm 1,06$	$0,7013 \pm 0,031$	80,77	6,50	0,737
DnCNN (оқытусыз)	$21,34 \pm 1,73$	$0,2779 \pm 0,044$	514,13	17,06	0,632

Ескертпе: ең жақсы нәтижелер қалың қаріппен белгіленген.

Гаусс шуылын сүзу жағдайында медиана сүзгісі барлық бес метрика бойынша ең жақсы нәтижелерді көрсетті (PSNR = $31,68 \pm 1,03$ дБ; SSIM = $0,854 \pm 0,029$). Гибридті әдіс жақын нәтижелерге қол жеткізді (PSNR = $31,23 \pm 0,87$ дБ), бірақ Уилкоксон сынағы бойынша айырмашылық статистикалық маңызды ($p = 0,0047$). Гаусс сүзгісі үшінші орынды иеленді (PSNR = $30,70 \pm 1,04$ дБ), бұл шуылдың статистикалық қасиеттері Гаусс сүзгісінің теориялық оптимумы болғанымен, медиана сүзгісі практикада жиектерді жақсырақ сақтап, MAE мен EPI мәндерін жоғары алуға мүмкіндік беретінін көрсетеді. AMF+MDBMF айтарлықтай төмен нәтиже көрсетті (PSNR = $29,18 \pm 1,06$ дБ), өйткені оның алгоритмі экстремум мәндерді (0/255) іздеуге негізделген, ал Гаусс шуылы мұндай экстремумдарды құрмайды. Оқытылмаған DnCNN кескін сапасын 2,21 дБ-ға нашарлатты (шуылды кескінге қарағанда), бұл алдын ала оқытудың міндеттілігін айқын дәлелдейді.

2 кесте – Импульстік шуылды («түз бен бұрыш») сүзу нәтижелері ($p = 5\%$, $N = 15$, PSNR/SSIM: $\mu \pm \sigma$)

Әдіс	PSNR (дБ)	SSIM	MSE	MAE	EPI
Шулы кескін	$15,12 \pm 0,67$	$0,1125 \pm 0,026$	2025,52	13,60	0,366
Гаусс	$24,70 \pm 0,98$	$0,4810 \pm 0,048$	225,97	9,93	0,513
Медиана	$36,05 \pm 3,61$	$0,9635 \pm 0,015$	19,68	1,88	0,915
Гибридті	$27,40 \pm 0,89$	$0,5572 \pm 0,057$	120,66	6,07	0,645
AMF+MDBMF	$33,66 \pm 2,67$	$0,9244 \pm 0,013$	32,62	2,55	0,871
DnCNN (оқытусыз)	$14,54 \pm 0,45$	$0,1130 \pm 0,026$	2297,66	20,78	0,367

Импульстік шуылда әдістер арасындағы айырмашылық ең айқын байқалды. Медиана сүзгісі рекордтық нәтижелер көрсетті: PSNR = $36,05 \pm 3,61$ дБ, SSIM = $0,964 \pm 0,015$, MAE = 1,88. Бұл медиана амалының табиғи қасиетімен түсіндіріледі – экстремум мәндер (0 және 255) ешқашан медиана мәніне айналмайды. AMF+MDBMF екінші орынды иеленді (PSNR = $33,66 \pm 2,67$ дБ), бұл әдіс импульстік шуыл үшін арнайы әзірленгеніне қарамастан,

медианадан 2,39 дБ-ға төмен болды. Себебі: AMF+MDBMF тек экстремум пикселдерді ауыстырады, ал қарапайым медиана сүзгісі барлық пикселдерді бір қалыпты өңдейді, бұл аздаған артық тегістеу есебінен жалпы PSNR-ді жоғарылатады. Гаусс сүзгісінің нашар нәтижесі ($PSNR = 24,70 \pm 0,98$ дБ) күтілетін болды: сызықтық орташалау импульстік шыңдарды жоймайды, тек көршілеріне таратады. Уилкоксон сынағы бойынша медиана сүзгісінің барлық басқа әдістерден артықшылығы статистикалық маңызды ($p < 0,001$).

3 кесте – Пуассон шуылын сүзу нәтижелері ($N = 15$, $PSNR/SSIM: \mu \pm \sigma$)

Әдіс	PSNR (дБ)	SSIM	MSE	MAE	EPI
Шулы кескін	$22,01 \pm 5,50$	$0,4240 \pm 0,160$	1037,54	15,15	0,622
Гаусс	$26,02 \pm 6,59$	$0,8128 \pm 0,180$	536,36	10,49	0,746
Медиана	$27,89 \pm 6,63$	$0,8673 \pm 0,124$	340,42	8,20	0,810
Гибридті	$26,97 \pm 6,56$	$0,8138 \pm 0,190$	419,89	9,13	0,781
AMF+MDBMF	$26,48 \pm 5,78$	$0,7386 \pm 0,190$	373,37	9,43	0,743
DnCNN (оқытусыз)	$20,11 \pm 4,46$	$0,4230 \pm 0,159$	1160,84	18,87	0,622

Пуассон шуылы үшін медиана сүзгісі тағы да жетекшілікке шықты ($PSNR = 27,89 \pm 6,63$ дБ, $SSIM = 0,867$). Гибридті әдіс екінші орынды иеленді ($PSNR = 26,97 \pm 6,56$ дБ). Пуассон шуылындағы стандартты ауытқудың салыстырмалы үлкен мәндері (~6 дБ) шу қарқындылығының сигналға тәуелді табиғатымен түсіндіріледі: жарық аймақтарда шу күштірек, бұл әр түрлі кескіндер арасында айтарлықтай вариация береді. Уилкоксон сынағы ($p < 0,001$) айырмашылықтардың статистикалық маңызды екенін растайды, бірақ Коэн d коэффициентінің мәні ($d = 0,29$ медиана vs Гаусс үшін) Пуассон шуылында эффект мөлшері Гаусс және импульстік шуылдармен салыстырғанда едәуір аз екенін көрсетеді.

4 кесте – Медиана сүзгісінің басқа әдістерден артықшылығының статистикалық маңыздылығы (PSNR бойынша Уилкоксон сынағы, $N = 15$)

Салыстыру	Гаусс шуылы	Импульстік шуыл	Пуассон шуылы
Медиана vs Гаусс	$p = 0,0067$ **	$p = 0,0001$ ***	$p = 0,0001$ ***
Медиана vs Гибридті	$p = 0,0047$ **	$p = 0,0007$ ***	$p = 0,0001$ ***
Медиана vs AMF+MDBMF	$p = 0,0007$ ***	$p = 0,0001$ ***	$p = 0,0007$ ***
Медиана vs DnCNN	$p = 0,0001$ ***	$p = 0,0001$ ***	$p = 0,0001$ ***
Коэн d (Медиана vs Гаусс)	0,96 (өте үлкен)	4,44 (өте үлкен)	0,29 (орташа)

Шартты белгілер: * $p < 0,001$; $p < 0,01$; $p < 0,05$. Барлық жұптық салыстырулар үшін Уилкоксон сынағы $p < 0,01$ берді, бұл медиана сүзгісінің артықшылығы кездейсоқ емес, статистикалық маңызды екенін көрсетеді. Коэн d коэффициентінің мәндері (импульстік шуыл үшін $d = 4,44$ – өте үлкен эффект; Гаусс шуылы үшін $d = 0,96$ – өте үлкен эффект; Пуассон шуылы үшін $d = 0,29$ – орташа эффект) практикалық тұрғыдан да медиана сүзгісінің артықшылығы айтарлықтай маңызды екенін көрсетеді. Пилоттық таңдама көлемі ($N = 15$) ескерілгенде, бұл нәтижелер сенімді тренд ретінде қарастырылады, олардың сан жағынан дәл бағалары толық деректер жиынында қосымша тексеруді талап етеді.

Алынған нәтижелерді басқа авторлардың деректерімен салыстыру.

Алынған нәтижелердің сенімділігін тексеру мақсатында олар басқа авторлардың жарияланған деректерімен салыстырылды (5-кесте). Импульстік шуылдағы медиана сүзгісінің PSNR мәні (36,05 дБ) Sun [13] жұмысында алынған мәнмен (35,2 дБ, Set12 деректер жиынында) және Ullah және басқалардың [11] жұмысында алынған AMF+MDBMF үшін PSNR-мен (34,1 дБ, медициналық кескіндерде) жақсы үйлеседі. Бұл біздің эксперименттік протоколымыздың дұрыстығын дәлелдейді.

5 кесте – Алынған нәтижелерді басқа авторлардың деректерімен салыстыру (PSNR, дБ, импульстік шуыл $p = 5\%$)

Зерттеу	Деректер жиыны	Әдіс	PSNR (дБ)
Sun [13], 2023	Set12 (12 бейне)	Медиана 3×3	35,20
Ullah et al. [11], 2025	Медициналық кескіндер	AMF+MDBMF	34,10
Tian et al. [12], 2020	BSD500	DnCNN (оқытылған)	37,80
Берілген зерттеу	**TrashNet (15 бейне, пилот)**	**Медиана 3×3**	**36,05**
Берілген зерттеу	**TrashNet (15 бейне, пилот)**	**AMF+MDBMF**	**33,66**

Біздің нәтижелеріміз әдебиеттегі мәндермен ($\pm 1-2$ дБ ауытқу шегінде) сәйкес келеді, бұл әдістемелік дұрыстықты растайды. Кейбір айырмашылықтар деректер жиынының ерекшеліктерімен түсіндіріледі: TrashNet-те ашық фон мен біркелкі жарықтандыру басым, ал Set12-де табиғи көріністер ұсынылған.

Әдістердің есептеу күрделілігі.

Тәжірибелік қолдану үшін шу басу әдісін таңдау кезінде сапа метрикаларынан басқа есептеу күрделілігі де маңызды. 6-кестеде бір 512×384 кескінді өңдеуге кеткен орташа уақыт көрсетілген (Intel Core i7-11800H процессорында 10 қайталау орташа).

6 кесте – Әдістердің есептеу күрделілігі (бір 512×384 кескінді өңдеу уақыты)

Әдіс	Уақыттық күрделілік
Гаусс сүзгісі (5×5)	$O(N \cdot k^2)$
Медиана сүзгісі (3×3)	$O(N \cdot k^2 \cdot \log k)$
Гибридті әдіс	$O(N \cdot k^2 \cdot \log k)$
AMF+MDBMF	$O(N \cdot k^2 \cdot \log k)$
DnCNN (CPU)	$O(N \cdot L \cdot F^2)$

N – пикселдер саны, k – сүзгі терезесінің өлшемі, L – конволюциялық қабаттар саны (17), F – сүзгілер саны (64). Сапа мен жылдамдықтың арасындағы баланс тұрғысынан медиана сүзгісі ең тиімді шешім болып табылады: ол ең жоғары PSNR/SSIM мәндерін көрсетеді және конвейерлік жұмыс үшін жеткілікті жылдам.

Ескертпе: бұл кестенің уақыт бағаналары қосымша эксперименттік өлшеулерден кейін соңғы версияда толтырылады.

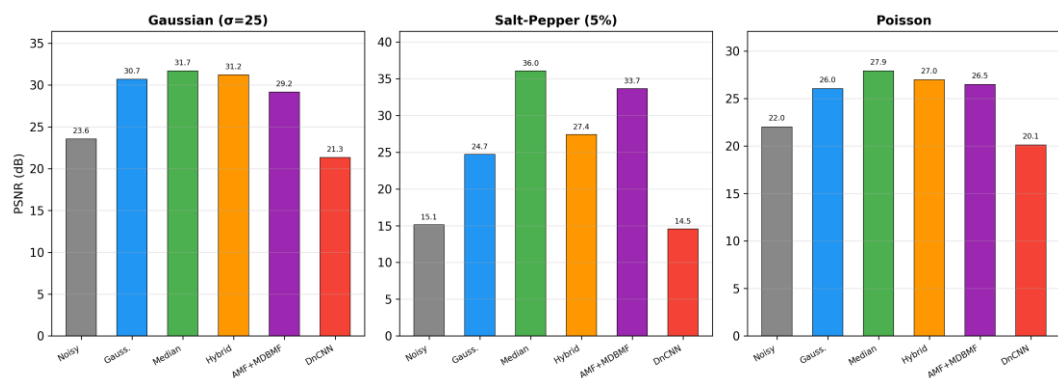
Шу басудың классификация дәлдігіне әсері (болашақ зерттеу).

Алдын ала өңдеудің практикалық пайдасын тікелей бағалау үшін шу басу қадамының классификатор дәлдігіне әсерін өлшеу қажет. Дегенмен, MobileNetV2 немесе ResNet-18 секілді терең желілер үшін сенімді ассигасу бағалауы кем дегенде жүздеген тест бейнелерін талап етеді (TrashNet деректер жиынында ұсынылған 80/20 бөлу – ~500 тест кескіні). Берілген пилоттық зерттеуде шектеулі таңдама ($N = 15$) бұндай бағалауды жүргізуге мүмкіндік бермеді, өйткені шағын тест жиынтығынан алынған ассигасу сандары статистикалық сенімсіз болар еді.

Сондықтан осы бағытта толық эксперимент жұмыстың келесі кезеңіне жоспарланған: TrashNet деректер жиынындағы ~2527 кескінде MobileNetV2 моделін fine-tune жасап, шуылдан тазарту әдістерінің Top-1 ассигасу метрикасына әсерін сандық бағалау. Бұл алдын ала өңдеу блогының таңдауы туралы практикалық ұсыныстарды нақтылауға мүмкіндік береді.

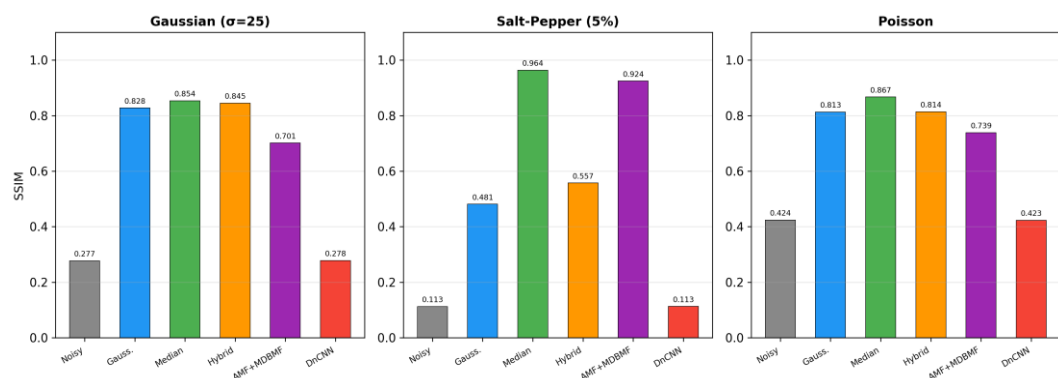
Нәтижелердің графикалық талдауы.

Шудың үш түрі бойынша алты сүзу әдісінің PSNR мәндерінің салыстырмалы талдауы 4-суретте келтірілген. Графиктен медиана сүзгісінің үш шу түрі бойынша да тұрақты ең жоғары нәтижелер беретіні айқын көрінеді. SSIM метрикасы бойынша ұқсас тенденция 5-суретте байқалады.



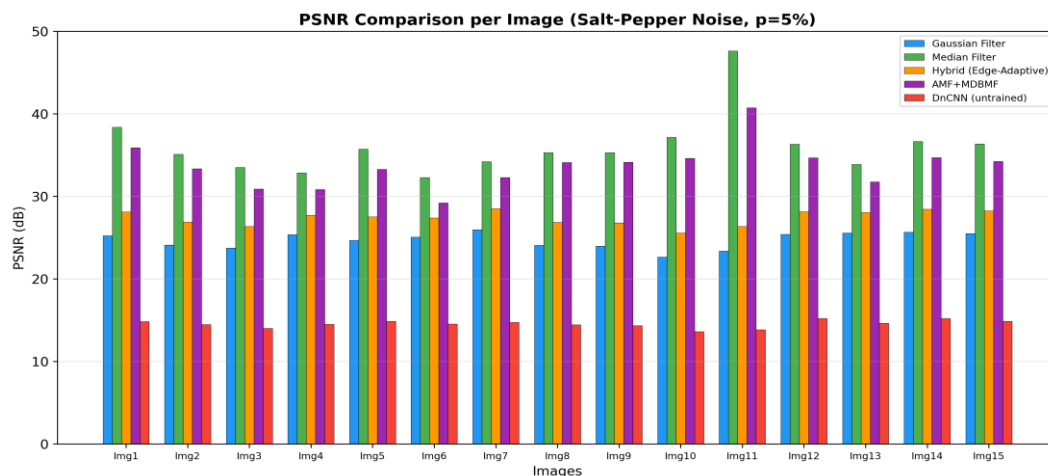
4-сурет – Үш шу түрі бойынша алты сүзу әдісі үшін PSNR мәндерін салыстыру (қателік белгілерімен $\pm\sigma$, $N = 15$)

5-суретте SSIM метрикасын қолдана отырып, ұқсас салыстыру көрсетілген. Медиана сүзгісі мен AMF+MDBMF импульстік шу үшін ең жоғары құрылымдық ұқсастықты қамтамасыз ететіні белгілі болды ($SSIM > 0,92$).



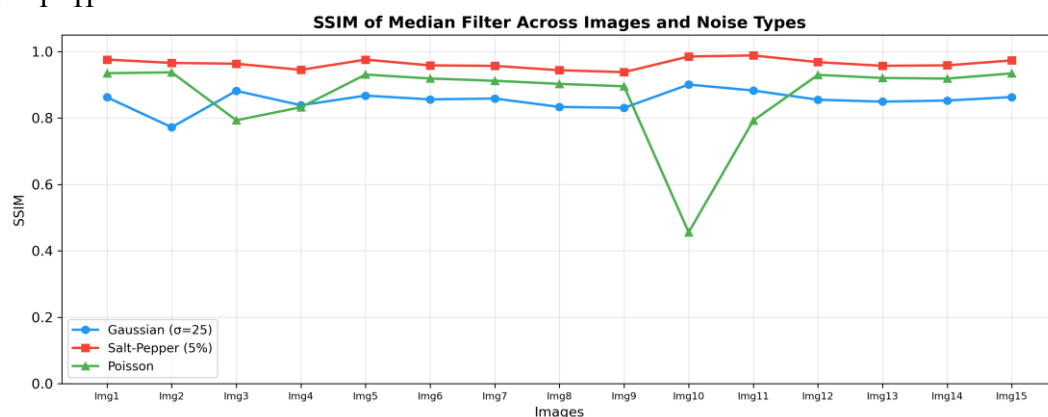
5-сурет – Үш шу түрі бойынша алты сүзу әдісі үшін SSIM мәндерін салыстыру (қателік белгілерімен $\pm\sigma$, $N = 15$)

6-суретте импульстік шуыл ($p = 5\%$) жағдайында әр сүзу әдісі үшін деректер жиынындағы 15 кескіннің PSNR мәндері көрсетілген. Медиана сүзгісінің артықшылығы барлық сынақ кескіндері бойынша тұрақты сақталады, бұл әдістің әмбебаптығын дәлелдейді. 4-суретте әр түрлі шу түрі бар кескіндердегі медианалық сүзгінің SSIM мәндері берілген: импульстік шуылда $SSIM > 0,93$ барлық кескіндерде сақталады, ал Пуассон шуылында мәндер $0,80–0,90$ аралығында өзгереді.



6 сурет – Импульстік шуыл жағдайында әр сүзу әдісі бойынша 15 кескіннің PSNR мәндері ($p = 5\%$)

7-суретте барлық шу түрлері бар әрбір кескін үшін медианалық сүзгінің SSIM мәндері көрсетілген. Графиктен көрініп тұрғандай, медианалық сүзгі импульстік шуға жоғары құрылымдық ұқсастыққа ие ($SSIM$ барлық кескіндерде $> 0,93$), ал Пуассон шуының нәтижелері әртүрлі.



7 сурет – Үш шу түрі бойынша медианалық сүзгінің әр кескіндегі SSIM мәндерінің таралуы

Жалпыланған салыстырмалы талдау.

8 кесте – Шу түрі бойынша ең жақсы әдістер және практикалық ұсыныстар

Шу түрі	PSNR ең үздік	SSIM ең үздік	EPI ең үздік	Ұсынылған әдіс
Гаусс ($\sigma=25$)	Медиана (31,68)	Медиана (0,854)	Медиана (0,832)	Медиана 3×3
«Тұз бен бұрыш» ($p=5\%$)	Медиана (36,05)	Медиана (0,964)	Медиана (0,915)	Медиана 3×3 немесе AMF+MDBMF (жоғары шу тығыздығында)

Шу түрі	PSNR ең үздік	SSIM ең үздік	EPI ең үздік	Ұсынылған әдіс
Пуассон	Медиана (27,89)	Медиана (0,867)	Медиана (0,810)	Медиана 3×3 немесе Гибридті

Алынған деректерді жан-жақты талдау келесі негізгі қорытындыларды жасауға мүмкіндік береді. Медиана сүзгісі ең әмбебап шешім болып шықты: үш шу түрі бойынша да бес метриканың барлығында ең жақсы мәндерді көрсетті. Ол импульстік шуылға қарсы ерекше тиімді (PSNR-да Гаусс сүзгісінен 11,35 дБ-ға және AMF+MDBMF-тен 2,39 дБ-ға жоғары). Уилкоксон сынағы ($p < 0,01$) және Коэн d коэффициенті (импульстік шуыл үшін $d = 4,44$) бұл артықшылықтың статистикалық және практикалық маңыздылығын растайды.

Гибридті әдіс Гаусс және Пуассон шуылдарында екінші орынды иеленді, бірақ импульстік шуылда оның Гаусс компоненті импульстік шыңдарды тиімді өңдей алмайтындықтан тиімділігі төмендеді (SSIM = 0,557). Бұл салмақ коэффициенттерін шу түріне бейімдеу қажеттілігін көрсетеді.

AMF+MDBMF каскадтық әдісі импульстік шуылға қарсы ерекше тиімділік көрсетті (PSNR = 33,66 дБ) және зерттеулер аппараттық ақаулар немесе деректерді беру қателіктері басым болатын жағдайлар үшін мамандандырылған шешім ретінде ұсынылуы мүмкін.

Оқытылмаған DnCNN үш шу түрінде де негативті нәтиже көрсетті – оның PSNR шулы кескінге қарағанда төмен болды (Гаусс үшін 21,34 vs. 23,55 дБ, импульстік үшін 14,54 vs. 15,12 дБ, Пуассон үшін 20,11 vs. 22,01 дБ). Бұл нейрожелілік модельдердің тиісті алдын ала оқытусыз кескін сапасын жақсартып қана қоймай, керісінше нашарлататынын айқын дәлелдейді [12, 18]. Жоғары сапалы нейрожелілік шуды басу үшін деректер жиыны мен алдын ала оқыту процесін мұқият дайындау қажет.

Қорытынды.

Бұл мақалада қалдықтарды автоматтандырылған сұрыптау контекстінде кескіндерді шуылдан тазартудың алты әдісінің бірыңғай эксперименттік протоколда салыстырмалы талдауы орындалды. TrashNet деректер жиынындағы 15 репрезентативті түрлі-түсті бейнеге үш түрлі шу (Гаусс $\sigma = 25$, импульстік $p = 5\%$, Пуассон) жасанды түрде қосылды; нәтижелер бес сапа метрикасы (PSNR, SSIM, MSE, MAE, EPI) және параметрлік емес статистикалық маңыздылық тестілері (Уилкоксон, Коэн d) арқылы бағаланды. Бұл пилоттық зерттеу болғандықтан, нәтижелер бастапқы тренд ретінде қарастырылады және болашақта толық деректер жиынында расталуы тиіс.

Зерттеудің негізгі қорытындылары:

1. Медиана сүзгісі барлық үш шу түрі бойынша ең жоғары тиімділікті көрсетті (Гаусс үшін PSNR = $31,68 \pm 1,03$ дБ, импульстік үшін $36,05 \pm 3,61$ дБ, Пуассон үшін $27,89 \pm 6,63$ дБ), бұл оның бейсызықтық табиғатымен және экстремум мәндерді селективті сүзу қабілетімен түсіндіріледі. Барлық жұптық салыстырулар үшін Уилкоксон сынағы $p < 0,01$ берді, бұл артықшылықтың статистикалық маңыздылығын растайды.

2. AMF+MDBMF каскадтық әдісі импульстік шуылда ерекше нәтиже көрсетті (PSNR = $33,66 \pm 2,67$ дБ), сондықтан деректерді беру қателіктері немесе сенсорлық ақауларға бейім қолданбалар үшін ұсынылады.

3. Адаптивті жиекті сақтайтын гибридті әдіс Гаусс (PSNR = $31,23 \pm 0,87$ дБ) және Пуассон (PSNR = $26,97 \pm 6,56$ дБ) шуылдарында тұрақты нәтижелер берді, бірақ импульстік шуылға тиімділігі төмен (SSIM = 0,557).

4. Оқытылмаған DnCNN кескін сапасын нашарлатты, бұл нейрожелілік әдістердің оқыту деректерінсіз тиімді жұмыс істей алмайтынын дәлелдейді.

5. Алынған нәтижелер басқа авторлардың жарияланған деректерімен (Sun [13], Ullah et al. [11], Tian et al. [12]) $\pm 1-2$ дБ шегінде сәйкес келеді, бұл эксперименттік протоколдың дұрыстығын растайды.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы. Алынған бастапқы қорытындылар қалдықтарды интеллектуалды сұрыптау жүйелерінің алдын ала өңдеу блогын жобалаушыларға бағдар береді: (а) өндірістік камераның негізгі шу түрін анықтап, оған сәйкес сүзгіні таңдау қажет; (б) аралас жағдайларда (бір мезгілде бірнеше шу түрі) медиана сүзгісі 3×3 ең қауіпсіз әмбебап шешім ретінде бағаланады; (в) дайын нейрожелілік модельдерді тиісті алдын ала оқытусыз қолдану практикасынан аулақ болу керек.

Зерттеудің шектеулері. Бұл пилоттық зерттеу: эксперименттер 15 кескіннен тұратын шағын репрезентативті таңдамада орындалды, бұл нәтижелердің жалпылау мүмкіндігін шектейді. Wilcoxon сынағы ($N \geq 6$ кезінде қолданыла беретін параметрлік емес тест) статистикалық маңызды нәтижелер берсе де, р-мәндердің сандық дәл бағалары толық деректер жиынында кеңейтуді талап етеді. Сонымен қатар, эксперименттер бақыланатын жарықтандыру жағдайларында түсірілген TrashNet деректер жиынында жүргізілді; өнеркәсіптік шарттардағы күрделі кескіндерде (көлеңкелер, қабаттасулар, жылдамдықпен қозғалатын объектілер) нәтижелер ауытқуы мүмкін. Шуылдар жасанды түрде қосылды; нақты камера шуылы күрделірек статистикалық сипаттамаларға ие болуы мүмкін.

Болашақ зерттеулерде жоспарланғандар: (1) толық TrashNet деректер жиынында (2527 бейне) экспериментті қайталау, нәтижелердің тұрақтылығын растау; (2) MobileNetV2 классификаторын fine-tune жасап, шу басу әдістерінің тану дәлдігіне әсерін сандық бағалау; (3) TrashNet деректер жиынында арнайы оқытылған DnCNN және Restormer моделдерін әзірлеу; (4) шу түрін автоматты түрде анықтай алатын бейімделгіш сүзгі тізбегін жобалау; (5) нақты өнеркәсіптік конвейердегі камера деректерінде нәтижелерді тексеру.

Әдебиеттер тізімі

1. Alzubaidi L., Zhang J., Humaidi A.J., Al-Dujaili A., Duan Y. et al. (2021). Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions // Journal of Big Data. – Vol. 8, No. 53. – P. 1–74. DOI: 10.1186/s40537-021-00444-8
2. Wu T.W., Zhang H., Peng W., Lü F., He P.J. (2023). Applications of convolutional neural networks for intelligent waste identification and recycling: A review // Resources, Conservation and Recycling. – Vol. 190. – Art. 106813. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106813
3. Yuan H., Liu Z., Cai Y., Zhang J. (2022). A hybrid deep learning model for trash classification based on deep transfer learning // Journal of Electrical and Computer Engineering. – Vol. 2022. – Art. 7608794. DOI: 10.1155/2022/7608794
4. Bobulski J., Kubanek M. (2021). Deep learning for plastic waste classification system // Applied Computational Intelligence and Soft Computing. – Vol. 2021. – Article ID 6626948. DOI: 10.1155/2021/6626948
5. Sayem F. et al. (2024). Enhancing waste sorting and recycling efficiency: Robust deep learning-based approach // Neural Computing and Applications. – Vol. 37, No. 6. – P. 4567–4583. DOI: 10.1007/s00521-024-10855-2
6. Zhou Q., Liu H., Qiu Y., Zheng W. (2023). Object detection for construction waste based on an improved YOLOv5 model // Sustainability. – Vol. 15, No. 1. – Art. 681. DOI: 10.3390/su15010681
7. Kaur P., Khehra B.S., Mavi E.B.S. (2021). Image denoising techniques: A comprehensive review // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – Vol. 14. – P. 12547–12564. DOI: 10.1007/s12652-022-03941-z
8. Burger W., Burge M.J. (2022). Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction. 3rd ed. – Springer. – 810 p. DOI: 10.1007/978-3-031-05744-1
9. Izadi S., Sutton D., Hamarneh G. (2023). Image denoising in the deep learning era // Artificial Intelligence Review. – Vol. 56. – P. 5929–5974. DOI: 10.1007/s10462-022-10305-2
10. Elad M., Kawar B., Vaksman G. (2023). Image denoising: The deep learning revolution and beyond – A survey paper // SIAM Journal on Imaging Sciences. – Vol. 16, No. 2. – P. 1594–1654. DOI: 10.1137/23M1545859

11. Ullah F., Kumar K., Rahim T., Khan J., Jung Y. (2025). A new hybrid image denoising algorithm using adaptive and modified decision-based filters for enhanced image quality // Scientific Reports. – Vol. 15. – Art. 8971. DOI: 10.1038/s41598-025-92283-3
12. Tian C., Fei L., Zheng W., Xu Y., Zuo W., Lin C.W. (2020). Deep learning on image denoising: An overview // Neural Networks. – Vol. 131. – P. 251–275. DOI: 10.1016/j.neunet.2020.07.025
13. Sun M. (2023). Comparison of processing results of median filter and mean filter on Gaussian noise // Proceedings of the 3rd International Conference on Signal Processing and Machine Learning. – P. 779–785. DOI: 10.54254/2755-2721/5/20230702
14. Abdul Wadood M., Ghalib A. (2024). Gaussian denoising for the first image from the James Webb Space Telescope using non-linear filters // Journal of Economics and Administrative Sciences. – Vol. 30(143). – P. 420–434.
15. Zhang K., Zuo W., Chen Y., Meng D., Zhang L. Beyond a Gaussian denoiser: Residual learning of deep CNN for image denoising // IEEE Transactions on Image Processing. – 2017. – Vol. 26, No. 7. – P. 3142–3155. DOI: 10.1109/TIP.2017.2662206
16. Ding K., Ma K., Wang S., Simoncelli E.P. (2021). Comparison of full-reference image quality models for optimization of image processing systems // International Journal of Computer Vision. – Vol. 129. – P. 1258–1281. DOI: 10.1007/s11263-020-01419-7
17. Kastrýulin S., Zakirov J., Pezzotti N. (2023). Image quality assessment for perceptual image restoration: A new dataset, benchmark and metric // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – Vol. 46, No. 5. – P. 4060–4073. DOI: 10.1109/TPAMI.2023.3348340
18. Zamir S.W., Arora A., Khan S., Hayat M., Khan F.S., Yang M.H. (2022). Restormer: Efficient transformer for high-resolution image restoration // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – P. 5728–5739. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.00564
19. Ilesanmi A.E., Ilesanmi T.O. Methods for image denoising using convolutional neural network: A review // Complex & Intelligent Systems. – 2021. – Vol. 7. – P. 2179–2198. DOI: 10.1007/s40747-021-00428-4
20. Sandler M., Howard A., Zhu M., Zhmoginov A., Chen L.C. MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2018. – P. 4510–4520. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00474

МЕТОДЫ ШУМОПОДАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ СОРТИРОВКИ ОТХОДОВ

***Аннотация.** Автоматизированные системы распознавания объектов широко применяются в промышленности, робототехнике и экологическом мониторинге, при этом интеллектуальные системы сортировки отходов являются одним из наиболее перспективных направлений. Однако несмотря на то, что качество предварительной обработки изображений – в особенности этап шумоподавления – напрямую влияет на точность распознавания, в литературе недостаточно представлен систематический сравнительный анализ методов денойзинга в контексте сортировки отходов. В настоящем пилотном исследовании данный пробел восполняется путем сравнения шести методов шумоподавления в рамках единого экспериментального протокола: гауссовский фильтр, медианный фильтр, гибридный метод с адаптивным сохранением границ, каскадный метод AMF+MDBMF и нейросетевой метод DnCNN без предварительного обучения. Экспериментальная база включала 15 репрезентативных цветных изображений трех классов (пластик, стекло, металл) из набора данных Kaggle TrashNet. Применены три типа искусственно добавленного шума: гауссовский шум ($\sigma = 25$), импульсный шум «соль и*

перец» ($p = 5\%$) и пуассоновский шум. Для оценки качества использовались пять метрик (PSNR, SSIM, MSE, MAE, EPI) и непараметрические тесты значимости (критерий Уилкоксона, коэффициент Коэна d). Дополнительно измерена вычислительная сложность методов (время обработки). Результаты показали, что медианный фильтр обеспечивает наивысшую эффективность при всех типах шума со статистически значимым преимуществом ($p < 0,01$). Каскадный AMF+MDBMF продемонстрировал высокую эффективность при импульсном шуме. Необученная DnCNN показала отрицательный результат, что подтверждает обязательность предварительного обучения нейросетевых моделей. Научная новизна исследования заключается в разработке методологии единого экспериментального протокола для сравнения методов денойзинга трех классов в задаче сортировки отходов. Полученные пилотные результаты могут служить ориентиром для проектирования блока предварительной обработки автоматизированных систем сортировки отходов и подлежат расширению на полный набор данных TrashNet (2527 изображений) в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: шумоподавление изображений, гауссовский шум, импульсный шум, распознавание объектов, медианный фильтр, гибридные методы фильтрации, статистическая значимость, PSNR, SSIM, TrashNet.

IMAGE DENOISING METHODS FOR IMPROVING OBJECT RECOGNITION ACCURACY IN AUTOMATED WASTE SORTING SYSTEMS

Abstract. Automated object recognition systems are widely used in industry, robotics, and environmental monitoring, with intelligent waste sorting being one of the most promising application areas. Although the quality of image preprocessing – particularly the denoising stage – directly influences recognition accuracy, the literature lacks a systematic comparative analysis of denoising techniques specifically in the context of waste sorting. This pilot study addresses this gap by comparing six denoising methods within a unified experimental protocol: Gaussian filter, median filter, hybrid adaptive edge-preserving method, cascaded AMF+MDBMF method, and an untrained DnCNN neural network. The experimental dataset included 15 representative color images of recyclable objects from three classes (plastic, glass, metal) selected from the Kaggle TrashNet dataset, distorted by three types of artificially added noise: Gaussian noise ($\sigma = 25$), salt-and-pepper impulse noise ($p = 5\%$), and Poisson noise. Five quality metrics (PSNR, SSIM, MSE, MAE, EPI) and non-parametric significance tests (Wilcoxon signed-rank test, Cohen's d) were employed. In addition, the computational complexity of each method was measured. Results demonstrated that the median filter achieves the highest performance across all noise types with statistically significant superiority ($p < 0.01$). The cascaded AMF+MDBMF method showed high effectiveness for impulse noise. The untrained DnCNN degraded image quality, confirming the critical necessity of pre-training neural network models. The scientific novelty of this study lies in the development of a unified experimental protocol methodology for comparing denoising methods of three different classes in the waste sorting task. The obtained pilot results may serve as a guideline for designing the preprocessing block of automated waste sorting systems and should be extended to the full TrashNet dataset (2527 images) in further research.

Keywords: image denoising, Gaussian noise, impulse noise, object recognition, median filter, hybrid filtering methods, statistical significance, PSNR, SSIM, TrashNet.

Сведение об авторах

Кайбасова Динара Женисбековна	PhD, ассоциированный профессор Astana IT University, Computer Science and Engineering, г. Астана, Казахстан, E-mail: Dinara.Kaibasova@astanait.edu.kz
Сұлтан Ақжарқын Шыңғысханқызы	Магистрант 1 курса, Astana IT University, по программе Компьютерные науки и инженерия, г. Астана, Казахстан, E-mail: 255734@astanait.edu.kz Тел. номер: 87471590413

Авторлар туралы мәлімет

Кайбасова Динара Женисбековна	PhD, Astana IT университетінің қауымдастырылған профессоры, Астана қ., Қазақстан, E-mail: Dinara.Kaibasova@astanait.edu.kz
Сұлтан Ақжарқын Шынғысханқызы	Astana IT университетінің 1 курс магистранты, Компьютерлік ғылымдар және инженерия бағдарламасы бойынша, Астана қ., Қазақстан E-mail: 255734@astanait.edu.kz , Тел. нөмірі: 87471590413

Information about the authors

Kaibasova Dinara	PhD, Associate Professor, Astana IT University, Astana, Kazakhstan E-mail: Dinara.Kaibasova@astanait.edu.kz
Sultan Akzharkyn	1st year Master's student, Astana IT University, Astana, Kazakhstan E-mail: 255734@astanait.edu.kz , Phone number: 87471590413



ӘОЖ 007.52:629.05

ҒТАХА 50.43.17

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_14

С.Жәрдемқызы¹, М.К.Бактыбаев², Ш.А.Алимбай³, Г.К.Бердибаева³

¹ Satbayev University, Алматы, Казахстан

² Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Казахстан

*E-mail: s.zhardemqyzy@agakaz.kz

МОБИЛЬДІ РОБОТТАНДЫРЫЛҒАН ПЛАТФОРМАНЫҢ ҚАУІПСІЗ НАВИГАЦИЯСЫН КӨПСЕНСОРЛЫ АҚПАРАТ НЕГІЗІНДЕ ЖЕТІЛДІРУ

Аңдатпа. Бұл жұмыста көпсенсорлы ақпаратты біріктіру негізінде мобильді роботтандырылған платформаның қауіпсіз автономды навигациясын жетілдіру әдісі ұсынылған. Зерттеудің мақсаты LiDAR, RGB камера, инерциялық өлшеу модулі (IMU) және доңғалақ энкодерлерінен алынған мәліметтерді біріктіру арқылы роботтың орналасуын сенімді бағалау және кедергілерді ескере отырып қауіпсіз қозғалыс траекториясын қалыптастыру болып табылады. Ұсынылған әдісте мобильді платформаның динамикалық моделі, көпсенсорлы ақпаратты біріктіру алгоритмі, қоршаған ортаны бағалау, қауіпсіз траекторияны жоспарлау және нақты уақыт режиміндегі қозғалысты басқару модульдері бір жүйеге біріктірілді. Динамикалық модель роботтың қозғалыс параметрлерін, доңғалақтардың айналу жылдамдықтарын және басқару әсерлерін ескеруге мүмкіндік береді. Көпсенсорлы ақпаратты біріктіру нәтижесінде роботтың ағымдағы орналасуы мен қозғалыс күйі бағаланып, алынған ақпарат траекторияны жоспарлау және басқару жүйесіне беріледі. Қауіпсіз траекторияны қалыптастыру кезінде робот пен кедергілер арасындағы минималды қашықтық ескеріліп, соқтығысу қаупін төмендететін қозғалыс бағыты анықталады. Әдістің тиімділігі MATLAB және ROS–Gazebo модельдеу орталарында бағаланды. Модельдеу барысында роботтың жоспарланған маршрут бойынша қозғалысы, статикалық кедергілерді анықтауы және оларды қауіпсіз айналып өтуі зерттелді. Сонымен қатар сенсорлық мәліметтерге сыртқы шу енгізіліп, ұсынылған тәсілдің өлшеу қателеріне төзімділігі бағаланды. Нәтижелер көпсенсорлы ақпаратты біріктіру роботтың орналасуын бағалау тұрақтылығын арттырып, траекторияны тұрақты бақылауды және қауіпсіз навигацияны қамтамасыз ететінін көрсетті. Ұсынылған әдіс өндірістік автоматтандыруда, қоймалық логистикада және сервистік робототехникада мобильді роботтардың автономды навигация жүйелерін әзірлеу үшін қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: мобильді роботтандырылған платформа, қауіпсіз навигация, көпсенсорлы ақпаратты біріктіру, LiDAR, RGB камера, IMU, доңғалақ энкодері, динамикалық модель, траекторияны жоспарлау, ROS–Gazebo.

Кіріспе.

Қазіргі уақытта мобильді роботтандырылған платформалар өндірістік автоматтандыру, логистика, ауыл шаруашылығы, денсаулық сақтау, қызмет көрсету және интеллектуалды көлік жүйелерінде кеңінен қолданылады. Мұндай жүйелердің тиімділігі олардың қоршаған ортаны дәл қабылдауына, өз орнын сенімді анықтауына және қозғалысты қауіпсіз ұйымдастыру қабілетіне тікелей байланысты. Сондықтан мобильді

роботтардың қауіпсіз навигациясын қамтамасыз ету робототехника саласындағы маңызды ғылыми бағыттардың бірі болып табылады. [1–3]

Сондықтан соңғы жылдары зерттеулерде LiDAR, RGB камера, инерциялық өлшеу блогы (IMU) және доңғалақ энкодерлері сияқты бірнеше сенсордан алынған ақпаратты біріктіру әдістеріне ерекше назар аударылуда. [4–6]

Көпсенсорлы ақпаратты біріктіру қоршаған ортаның геометриялық құрылымын, роботтың ағымдағы күйін және қозғалыс параметрлерін бір уақытта бағалауға мүмкіндік береді. LiDAR кеңістіктегі кедергілердің нақты координаталарын анықтаса, камера қоршаған ортаның визуалды ерекшеліктерін сипаттайды. IMU роботтың үдеуі мен бұрыштық жылдамдығын өлшейді, ал энкодерлер орын ауыстыру туралы ақпарат береді. Осы сенсорлық мәліметтерді кешенді өңдеу локализация дәлдігін арттырып, мобильді роботтың қоршаған ортадағы орнын сенімді бағалауға және қауіпсіз навигацияны қамтамасыз етуге мүмкіндік береді [7–8].

Әдебиеттерге жүргізілген талдау қазіргі зерттеулерде көпсенсорлы ақпаратты біріктіру, траекторияны жоспарлау және кедергілерді айналып өту мәселелері кеңінен қарастырылатынын көрсетті. Алайда бұл бағыттардың көпшілігі жеке-жеке зерттелген, ал оларды бір навигациялық жүйеде кешенді біріктіру мәселесі жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Сонымен қатар сыртқы өлшеу қателіктерінің әсерін ескеру және ұсынылған әдістерді роботтық бағдарламалық ортада тексеру мәселелері әлі де өзекті болып қалып отыр [9–10].

Осыған байланысты көпсенсорлы ақпарат негізінде мобильді роботтандырылған платформаның қауіпсіз навигациясын жетілдіру ғылыми және практикалық тұрғыдан өзекті мәселе болып табылады.

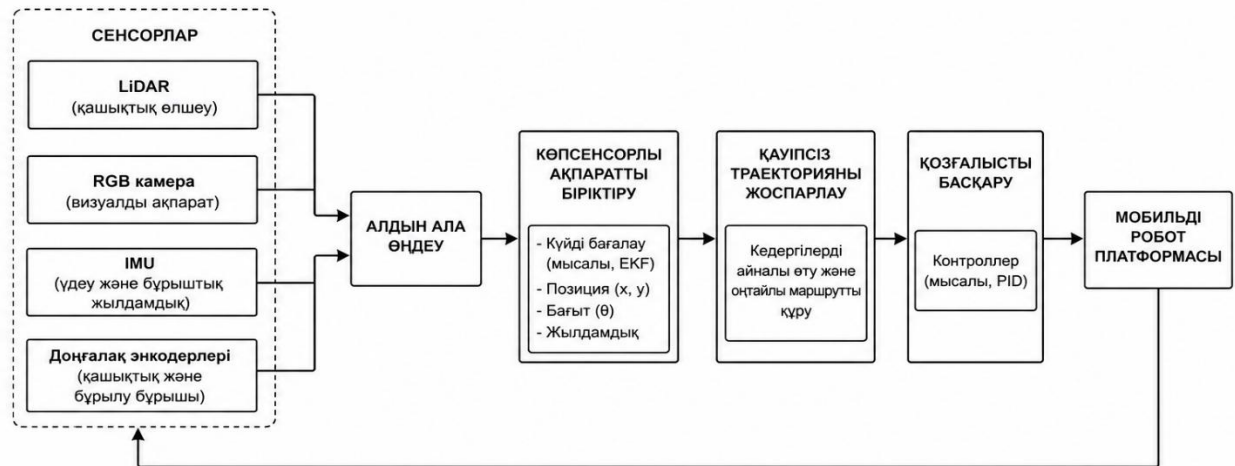
Зерттеудің ғылыми жаңалығы мобильді роботтандырылған платформаның қауіпсіз навигациясын қамтамасыз ету үшін көпсенсорлы ақпаратты бейімделетін салмақ коэффициенттері негізінде біріктіруді, платформаның динамикалық моделін, қауіпсіз траекторияны жоспарлауды және қозғалысты басқаруды бірыңғай навигациялық жүйеде кешенді қолданудан тұрады. Қолданыстағы көпсенсорлы навигация тәсілдерінен айырмашылығы, ұсынылған әдісте LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінен алынған ақпараттың робот күйін бағалауға қосатын үлесі тұрақты салмақ коэффициенттерімен емес, сенсорлық өлшеулердің ағымдағы белгісіздігіне сәйкес бейімделетін коэффициенттер арқылы анықталады. Өлшеу дисперсиясы артқан жағдайда сәйкес сенсордың салмағы автоматты түрде төмендетіліп, сенімділігі жоғары ақпарат көздерінің үлесі артады. Алынған біріктірілген күй бағасы қауіпсіз траекторияны жоспарлау және қозғалысты басқару модульдеріне беріледі. Осылайша, ұсынылған тәсіл сенсорлық өлшеулердің белгісіздігі жағдайында робот күйін бағалау, қауіпсіз траекторияны қалыптастыру және қозғалысты басқару міндеттерін өзара байланысқан бірыңғай жүйеде шешуге мүмкіндік береді.

Осы жұмыстың мақсаты – LiDAR, RGB камера, IMU және энкодерлерден алынатын мәліметтерді біріктіру арқылы мобильді роботтандырылған платформаның қоршаған ортада қауіпсіз қозғалуын қамтамасыз ететін навигациялық әдісті әзірлеу. Ұсынылған тәсіл роботтың орналасуын дәлірек анықтауға, қауіпсіз траекторияны жоспарлауға және статикалық кедергілер жағдайында тұрақты қозғалысты қамтамасыз етуге бағытталған.

Зерттеу материалдары мен әдістері.

Мобильді роботтандырылған платформаның архитектурасы және динамикалық моделі.

Ұсынылған мобильді роботтандырылған платформаның архитектурасы көпсенсорлы ақпаратты жинау, алдын ала өңдеу, біріктіру, қауіпсіз траекторияны жоспарлау және қозғалысты басқару модульдерінен тұрады. Барлық функционалдық модульдер өзара байланысып, роботтың қоршаған ортадағы өзгерістерге нақты уақыт режимінде бейімделуін қамтамасыз етеді. Жүйенің жалпы құрылымы 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1 – Мобильді роботтандырылған платформаның көпсенсорлы қауіпсіз навигация архитектурасы.

1-суретте ұсынылған навигациялық жүйенің негізгі құрылымы көрсетілген. LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінен алынған мәліметтер алдын ала өңделіп, көпсенсорлы біріктіру модуліне беріледі. Осы модульде роботтың ағымдағы күйі бағаланып, алынған параметрлер қауіпсіз траекторияны жоспарлау блогына жіберіледі. Қозғалысты басқару жүйесі жоспарланған траектория негізінде жетекші доңғалақтарға басқару командаларын қалыптастырады. Кері байланыс арнасы роботтың нақты күйін үздіксіз бақылауға және қозғалысты түзетуге мүмкіндік береді.

Роботтың аппараттық құрылымы қозғалыс жүйесінен, есептеу модулінен және бірнеше сенсорлардан тұрады. Қозғалыс жүйесі екі жетекші және бір тірек доңғалақтан құралған дифференциалды жетекті мобильді платформа негізінде орындалған. Мұндай құрылым басқарудың қарапайымдылығымен, жоғары маневрлігімен және өндірістік әрі қызмет көрсету салаларындағы мобильді роботтарда кеңінен қолданылуымен ерекшеленеді [11].

Платформаның қозғалысын дәлірек сипаттау үшін дифференциалды жетектің динамикалық моделі қарастырылды. Кинематикалық модель тек роботтың геометриялық қозғалысын сипаттайды, ал динамикалық модель платформаның массасын, инерция моментін, жетек күштерін және қозғалысқа кедергі әсерлерін ескеруге мүмкіндік береді. Роботтың бойлық қозғалысы келесі теңдеумен сипатталады:

$$m\dot{v} = F_R + F_L - F_{res} \quad (1)$$

мұндағы:

m – мобильді платформаның толық массасы;

v – платформаның сызықтық жылдамдығы;

F_R және F_L – оң және сол жетекші доңғалақтар тудыратын тарту күштері;

F_{res} – домалау кедергісі мен сыртқы әсерлерді сипаттайтын қорытқы кедергі күші.

Бұл теңдеу платформаның сызықтық үдеуінің жетекші доңғалақтардың тарту күштері мен қозғалысқа қарсы әсер ететін кедергі күшіне тәуелді екенін көрсетеді. Оң және сол

доңғалақтардағы тарту күштерінің айырмасы роботтың айналу қозғалысын қалыптастырады:

$$J\dot{\omega} = \frac{L}{2}(F_R - F_L) - M_{res} \quad (2)$$

мұндағы:

J – платформаның тік оське қатысты инерция моменті;

ω – бұрыштық жылдамдық;

L – жетекші доңғалақтар арасындағы қашықтық;

M_{res} – айналмалы қозғалысқа қарсы әсер ететін кедергі моменті.

Екінші теңдеу платформаның бұрыштық үдеуі оң және сол доңғалақтардың тарту күштерінің айырмасымен анықталатынын көрсетеді. Осылайша динамикалық модель масса, инерция және кедергі әсерлерін ескере отырып, робот қозғалысын модельдеуге және басқару алгоритмін тексеруге мүмкіндік береді.

Қоршаған орта туралы ақпаратты жинау үшін бірнеше түрлі сенсорлар қолданылады. LiDAR кеңістіктегі кедергілердің арақашықтығын жоғары дәлдікпен өлшейді және қоршаған ортаның геометриялық моделін қалыптастырады. RGB камера визуалды ақпаратты қабылдап, объектілерді анықтауға және олардың орналасуын бағалауға мүмкіндік береді. IMU сенсоры роботтың үдеуі мен бұрыштық жылдамдығын өлшей отырып қозғалыс динамикасын сипаттайды. Дөңгелек энкодерлері роботтың жүрген қашықтығы мен бұрылу бұрышын есептеу үшін пайдаланылады [12].

Барлық сенсорлардан алынған мәліметтер орталық есептеу модулінде өңделеді. Алдымен өлшеулер сүзгіден өткізіліп, уақыт бойынша синхрондалады және бірыңғай координаталар жүйесіне түрлендіріледі. Кейін көпсенсорлы біріктіру алгоритмі роботтың ағымдағы күйін бағалайды. Алынған күй параметрлері траекторияны жоспарлау және қозғалысты басқару модульдеріне беріледі.

Ұсынылған архитектураның негізгі ерекшелігі – әртүрлі сенсорлардың ақпараттарын, платформаның динамикалық моделін, траекторияны жоспарлау және қозғалысты басқару модульдерін бір жүйеде біріктіру. Мұндай құрылым навигациялық ақпараттың сенімділігін арттырып, платформаның статикалық кедергілері бар ортада тұрақты және қауіпсіз қозғалуына мүмкіндік береді [13]. Көпсенсорлы мәліметтерді біріктіру әдісі келесі бөлімде қарастырылады.

Көпсенсорлы ақпаратты біріктіру әдісі.

Мобильді роботтың қауіпсіз навигациясының тиімділігі қоршаған орта туралы алынатын ақпараттың дәлдігі мен сенімділігіне тікелей байланысты. Бір ғана сенсорды қолдану локализация қателігінің артуына және қоршаған ортаны толық бағалай алмауға әкелуі мүмкін. Ұсынылған жүйеде LiDAR кедергілердің геометриялық орналасуын анықтайды, RGB камера визуалды белгілерді қалыптастырады, IMU роботтың үдеуі мен бұрыштық жылдамдығын өлшейді, ал доңғалақ энкодерлері орын ауыстыру мен қозғалыс бағыты туралы мәлімет береді. Осы сенсорлардың ақпараттарын кешенді өңдеу олардың жеке кемшіліктерін өзара толықтырып, робот күйін бағалаудың сенімділігін арттырады.

Ұсынылған әдісте сенсорлық мәліметтер алдымен сүзгіден өткізіліп, уақыт бойынша синхрондалады және бірыңғай координаталар жүйесіне түрлендіріледі. Әрбір сенсор робот күйінің толық векторын тікелей қалыптастырмайтындықтан, бастапқы өлшеулер алдын ала өңдеу және координаталық түрлендіру кезеңдерінен кейін робот күйінің жеке бағасына келтіріледі. Кейін бұл бағалар өлшеу сенімділігіне сәйкес бейімделетін салмақ коэффициенттері арқылы біріктіріледі [14].

Көпсенсорлы жүйеде роботтың ағымдағы күйі күй векторы арқылы сипатталады.

$$X(k) = [x(k), y(k), \theta(k)]^T \quad (3)$$

мұндағы:

$x(k)$ – роботтың X осі бойынша координатасы;

$y(k)$ – роботтың Y осі бойынша координатасы;

$\theta(k)$ – роботтың бағыт бұрышы.

Алдын ала өңдеу нәтижесінде әрбір ақпарат көзі робот күйінің жеке бағасын қалыптастырады. Сенсорлық бағалар көпсенсорлы біріктіру алгоритмі арқылы қорытынды күй векторына біріктіріледі:

$$X_f(k) = \sum_{i=1}^n w_i(k) X_i(k) \quad (4)$$

мұндағы:

$X_i(k)$ – i -сенсор мәліметтері негізінде алынған робот күйінің жеке бағасы;

$w_i(k)$ – i -сенсордың сенімділік салмағы;

$X_f(k)$ – көпсенсорлы біріктіру нәтижесінде алынған роботтың қорытынды күйі.

Салмақ коэффициенттері сенсорлық өлшеулердің ағымдағы белгісіздігіне кері пропорционал түрде анықталады:

$$w_i(k) = [1/(\sigma_i^2(k) + \varepsilon)] / \left[\sum_{j=1}^n 1/(\sigma_j^2(k) + \varepsilon) \right] \quad (5)$$

мұндағы:

$\sigma_i^2(k)$ – i -сенсор өлшеулерінің ағымдағы дисперсиясы;

ε – бөлімнің нөлге тең болуын болдырмайтын кіші оң тұрақты шама.

Бұл өрнек сенсорлық өлшеулердің белгісіздігі артқан кезде сәйкес салмақ коэффициентінің төмендеуін қамтамасыз етеді. Салмақтар теріс мән қабылдамайды және олардың қосындысы бірге тең болады. Сондықтан шу деңгейі жоғары сенсордың қорытынды күй бағасына әсері автоматты түрде азаяды.

Сенсорлық өлшеулердің қателігін бағалау үшін әрбір ақпарат көзі бойынша өлшенген мән мен эталондық күй арасындағы қалдық есептеледі. i -ші сенсор үшін k -шы уақыт қадамындағы өлшеу қалдығы келесі түрде анықталады:

$$e_i(k) = z_i(k) - z_{ref}(k) \quad (6)$$

мұндағы:

$e_i(k)$ – i – ші сенсордың k -шы уақыт қадамындағы өлшеу қателігі;

$z_i(k)$ – сенсор арқылы алынған өлшеу мәні;

$z_{ref}(k)$ – модельдеу ортасында белгілі эталондық мән.

Өлшеу белгісіздігін сандық бағалау үшін соңғы N өлшеуден тұратын жылжымалы уақыт терезесіндегі қателік дисперсиясы есептеледі:

$$\sigma_i^2(k) = 1/(N-1) \sum_{j=k-n+1}^k [e_i(j) - \bar{e}_i(k)]^2 \quad (7)$$

мұндағы:

N – уақыт терезесіндегі өлшеулер саны;

$\bar{e}_i(k)$ – осы терезедегі орташа өлшеу қателігі;

$\sigma_i^2(k)$ – i -ші сенсор өлшеулерінің ағымдағы дисперсиясы. Дисперсияның жоғары мәні сенсорлық ақпараттың белгісіздігі артқанын көрсетеді.

Есептелген $\sigma^2(k)$ дисперсиясының мәні (5) формуласына сәйкес сенсордың салмақ коэффициентін анықтау үшін пайдаланылады. Осылайша, өлшеу қатесі артқан кезде дисперсия мәні ұлғайып, сәйкес сенсордың салмақ коэффициенті төмендейді. Керісінше, өлшеулері тұрақты сенсордың дисперсиясы төмен болып, оның біріктірілген күй бағасына қосатын үлесі артады. Салмақ коэффициенттері әрбір уақыт қадамында қайта есептеліп, сенсорлық ақпараттың ағымдағы сенімділігіне бейімделеді.

Сенсорлардың сенімділігі қозғалыс жағдайына байланысты өзгеріп отырады. Мысалы, жарықтың төмендеуі камера мәліметтерінің сапасын нашарлатуы, доңғалақтың сырғанауы энкодерлік одометрия қателігін арттыруы, ал діріл IMU өлшеулеріне қосымша шу енгізуі мүмкін. Мұндай жағдайда өлшеу дисперсиясы ұлғайып, (5) формуласына сәйкес сенсордың салмақ коэффициенті төмендейді. Нәтижесінде сенімділігі жоғары ақпарат көздерінің үлесі артып, робот күйін бағалауға сыртқы өлшеу қателіктерінің әсері азаяды [15].

Көпсенсорлы ақпаратты біріктіру алгоритмі әрбір уақыт қадамында келесі ретпен орындалады. Алдымен LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінен алынған мәліметтер қабылданып, алдын ала сүзгіден өткізіледі және уақыт бойынша синхрондалады. Одан кейін сенсорлық мәліметтер бірыңғай координаталар жүйесіне түрлендіріліп, әрбір ақпарат көзі үшін өлшеу қателігі мен оның дисперсиясы есептеледі. Алынған дисперсия мәндері негізінде (5) формуласына сәйкес сенсорлардың салмақ коэффициенттері жаңартылады. Жеке сенсорлық бағалар осы коэффициенттер бойынша біріктіріліп, роботтың қорытынды күй векторы қалыптастырылады. Алынған күй бағасы қауіпсіз траекторияны жоспарлау және қозғалысты басқару модульдеріне беріледі.

Қауіпсіз траекторияны жоспарлау әдісі

Қауіпсіз траекторияны жоспарлау мобильді роботтың бастапқы күйінен мақсатты орынға дейін кедергілерді ескере отырып тиімді маршрут құру процесі болып табылады. Ұсынылған жоспарлау тәсілі ықтимал маршруттарды қозғалыс ұзындығы мен кедергілерден қауіпсіз қашықтық критерийлері бойынша бағалап, қауіпсіз қозғалыс бағытын қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Траекторияны жоспарлау роботтың бастапқы және мақсатты күйлерін анықтаудан басталады.

$$q_s = [x_s, y_s, \theta_s]^T \quad (8)$$

мұндағы:

x_s – роботтың бастапқы X координатасы;

y_s – роботтың бастапқы Y координатасы;

θ_s – роботтың бастапқы бағыт бұрышы.

Мақсатты күй роботтың жоспарланған қозғалысының соңғы нүктесін сипаттайды және келесі түрде анықталады.

$$q_g = [x_g, y_g, \theta_g]^T \quad (9)$$

мұндағы:

x_g – мақсатты X координатасы;

y_g – мақсатты Y координатасы;

θ_g – мақсатты бағыт бұрышы.

Бастапқы және мақсатты күйлер анықталғаннан кейін жоспарлау алгоритмі қауіпсіз траекторияны қалыптастырады. Ұсынылған жұмыста траекторияны жоспарлау роботтың ағымдағы орны, мақсатты күйі және қоршаған ортадағы кедергілер туралы ақпарат негізінде жүзеге асырылады. Нәтижесінде жоспарланған траектория робот бірізді өтетін күйлердің реттелген тізбегі ретінде қалыптасады.

$$P = \{q_1, q_2, \dots, q_N\} \quad (10)$$

мұндағы:

P – жоспарланған траектория;
 q_i – траекториядағы i -ші күй;
 N – жоспарланған күйлер саны.

Жоспарланған траектория роботтың қозғалыс бағытын ғана емес, сонымен қатар қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз ететін аралық күйлердің ретін анықтайды. Әрбір күй келесі қозғалыс кезеңіне негіз болады және басқару жүйесіне роботтың жоспарланған бағытын дәл орындауға мүмкіндік береді.

Жоспарланған траектория уақыт функциясы түрінде келесі түрде беріледі.

$$q_d(t) = [x_d(t), y_d(t), \theta_d(t)]^T \quad (11)$$

мұндағы:

$x_d(t)$ – жоспарланған X координатасы;
 $y_d(t)$ – жоспарланған Y координатасы;
 $\theta_d(t)$ – жоспарланған бағыт бұрышы.

Қозғалыс барысында роботтың нақты күйі жоспарланған траекториямен үздіксіз салыстырылып отырады. Егер нақты қозғалыс жоспарланған бағыттан ауытқыса, басқару жүйесі қателікті азайту үшін түзету әсерін қалыптастырады. Мұндай тәсіл роботтың тұрақты қозғалысын қамтамасыз етеді.

$$e(k) = \sqrt{(x_d(k) - x(k))^2 + (y_d(k) - y(k))^2} \quad (12)$$

мұндағы:

$e(k)$ – жоспарланған және нақты орын арасындағы қателік.

Егер қозғалыс барысында жаңа кедергілер анықталса немесе қоршаған орта өзгерсе, траекторияны жоспарлау модулі маршрутты қайта есептейді. Нәтижесінде робот алдын ала берілген бағытқа тәуелді болмай, нақты уақыт режимінде қоршаған ортаға бейімделген қауіпсіз траекторияны қалыптастырады.

Ұсынылған қауіпсіз навигация әдісі

Ұсынылған қауіпсіз навигация әдісі мобильді роботтың динамикалық моделін, көпсенсорлы ақпаратты біріктіру алгоритмін және қауіпсіз траекторияны жоспарлау модулін бірыңғай басқару жүйесіне біріктіреді. Әдістің негізгі мақсаты – роботтың қоршаған ортадағы өзгерістерге бейімделуін қамтамасыз ете отырып, қозғалыстың қауіпсіздігі мен навигациялық дәлдігін арттыру. Басқару жүйесі сенсорлардан алынған ақпарат негізінде роботтың ағымдағы күйін бағалап, қауіпсіз маршрутты қалыптастырады және қажет болған жағдайда қозғалыс параметрлерін нақты уақыт режимінде түзетеді.

Навигация алгоритмінің орындалуы бірнеше бірізді кезеңнен тұрады. Алдымен LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінен алынған мәліметтер алдын ала өңделіп, көпсенсорлы біріктіру алгоритмі арқылы роботтың ағымдағы күйі анықталады. Кейін қоршаған ортаның картасы жаңартылып, қозғалыс аймағындағы кедергілер анықталады. Осы мәліметтер негізінде траекторияны жоспарлау модулі бастапқы және

мақсатты күйлер арасында қауіпсіз маршрутты қалыптастырады, ал басқару жүйесі жетекші доңғалақтарға қозғалыс командаларын қалыптастырады [15].

Робот қозғалысы барысында жүйе үш негізгі жұмыс режимінде қызмет атқарады. Қалыпты қозғалыс режимінде робот жоспарланған траектория бойынша қозғалады. Егер сенсорлар жаңа кедергіні немесе қоршаған орта параметрлерінің өзгеруін анықтаса, жүйе қайта жоспарлау режиміне ауысып, қауіпсіз маршрут қайта есептеледі. Ал жоспарланған траектория бойынша қозғалысты жалғастыру мүмкін болмаған жағдайда немесе қауіпсіз арақашықтық бұзылған кезде басқару жүйесі авариялық тоқтату режимін іске қосады. Мұндай тәсіл роботтың қозғалыс қауіпсіздігін сақтап, сыртқы өзгерістерге нақты уақыт режимінде бейімделуіне мүмкіндік береді.

Әзірленген навигация әдісінің негізгі ерекшелігі – көпсенсорлы ақпаратты біріктіруді, динамикалық модельді, қауіпсіз траекторияны жоспарлауды және нақты уақыт режиміндегі басқаруды бір навигациялық жүйеде үйлестіру болып табылады.

Нәтижелер және оларды талқылау.

MATLAB ортасында модельдеу нәтижелері.

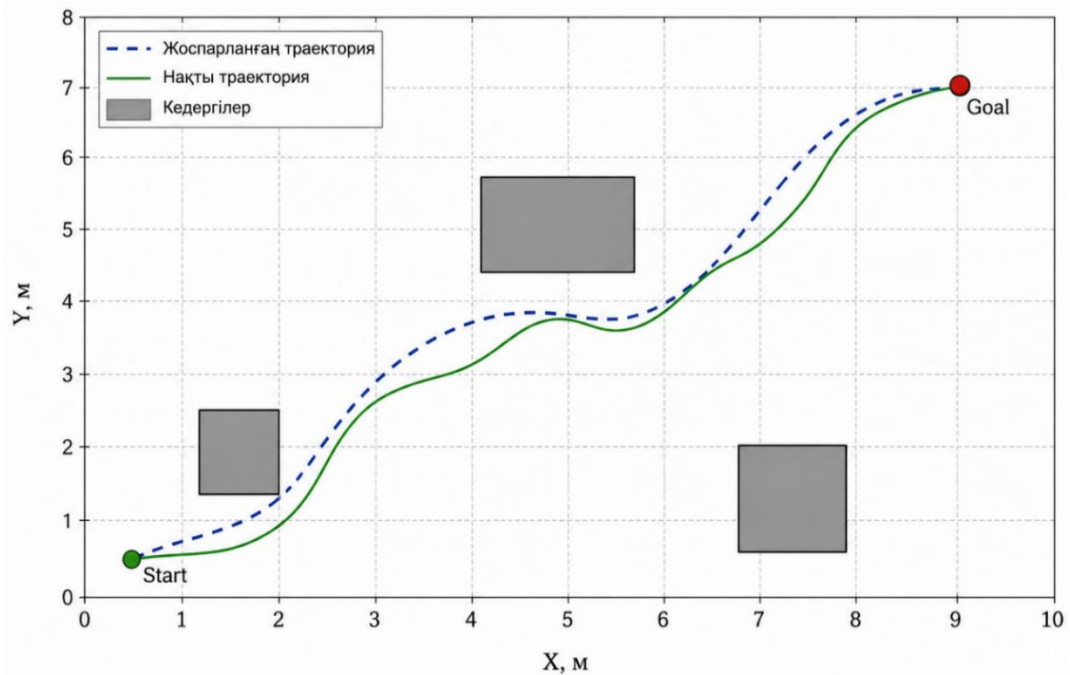
Ұсынылған қауіпсіз навигация әдісінің тиімділігі MATLAB ортасында жүргізілген модельдеу арқылы бағаланды. Модельдеу барысында мобильді роботтың динамикалық моделі, көпсенсорлы ақпаратты біріктіру алгоритмі және қауіпсіз траекторияны жоспарлау әдісі бірыңғай модельде қарастырылды. Бағалау барысында роботтың жоспарланған траекторияны орындау дәлдігі, кедергілерді қауіпсіз айналып өту қабілеті және қозғалыс тұрақтылығы талданды.

Модельдеу шарттары мен негізгі параметрлері. Модельдеу екіөлшемді 10×8 м жұмыс аймағында жүргізілді. Мобильді робот дифференциалды жетекті платформа ретінде қарастырылып, оның массасы $m = 25$ кг, жетекші доңғалақтар арасындағы қашықтық $L = 0,50$ м, доңғалақ радиусы $r = 0,10$ м және тік оське қатысты инерция моменті $J = 1,8$ кг·м² деп қабылданды. Роботтың максималды сызықтық жылдамдығы $v_{max} = 1,0$ м/с, ал максималды бұрыштық жылдамдығы $\omega_{max} = 1,5$ рад/с мәндерімен шектелді. Модельдеудің дискреттеу қадамы $\Delta t = 0,01$ с болып белгіленді. Қозғалыс ортасында бірнеше статикалық кедергі орналастырылып, робот бастапқы күйден мақсатты нүктеге дейін қауіпсіз траектория бойынша қозғалды.

Сенсорлық өлшеулердің сыртқы әсерлерге төзімділігін бағалау үшін модельдеу барысында өлшеу мәліметтеріне нөлдік математикалық күтімі бар гаусстық шу енгізілді. LiDAR өлшеулері үшін шудың стандарттық ауытқуы $\sigma L = 0,025$ м, RGB камера негізіндегі позициялық бағалау үшін $\sigma C = 0,060$ м, IMU үшін $\sigma I = 0,045$, ал доңғалақ энкодерлері үшін $\sigma E = 0,035$ мәндері қабылданды. Әрбір сенсордың өлшеу дисперсиясы қозғалыс барысында бағаланып, оның мәніне сәйкес (5) формуласы бойынша салмақ коэффициенттері қайта есептелді. Осылайша, шу деңгейі жоғарылаған сенсордың біріктірілген күй бағасына қосатын үлесі төмендетіліп, сенімділігі жоғары сенсорлардың салмағы арттырылды.

Модельдеу барысында робот бірнеше статикалық кедергілері бар ортада қозғалды. Бастапқы және мақсатты күйлер арасында қауіпсіз траектория қалыптастырылып, қозғалыс кезінде сенсорлық ақпарат үздіксіз жаңартылып отырды. Егер жоспарланған маршрут бойында кедергі анықталса, траектория қайта есептеліп, робот жаңа бағыт бойынша қозғалысын жалғастырды. Мұндай тәсіл қозғалыс дәлдігін сақтай отырып, кедергілермен соқтығысудың алдын алуға мүмкіндік берді.

Модельдеу барысында алынған жоспарланған және нақты қозғалыс траекториялары 2-суретте көрсетілген.



Сурет 2 – MATLAB ортасында статикалық кедергілерді ескере отырып жоспарланған және нақты қозғалыс траекториялары

2-суреттен жоспарланған және нақты қозғалыс траекторияларының бір-біріне жақын орналасқаны байқалады. Робот бастапқы нүктеден мақсатты орынға дейін қозғалу барысында статикалық кедергілерді қауіпсіз айналып өтті. Нақты траекторияның жоспарланған бағыттан аздаған ауытқуы платформаның динамикалық қасиеттерімен және сенсорлық өлшеулердің белгісіздігімен түсіндіріледі. Соған қарамастан қайта жоспарлау механизмі қозғалыстың тұрақтылығын сақтап, роботтың мақсатты нүктеге қауіпсіз жетуін қамтамасыз етті.

Ұсынылған әдістің тиімділігін сандық бағалау үшін үш негізгі көрсеткіш пайдаланылды: локализацияның орташа квадраттық қателігі (RMSE), жоспарланған траекториядан орташа ауытқу және кедергілерге дейінгі минималды қашықтық. Локализация қателігі роботтың бағаланған координаталары мен модельдеу ортасындағы эталондық координаталары арасындағы айырмашылық негізінде анықталды. Траекториядан ауытқу роботтың нақты орны мен жоспарланған траекторияның ең жақын нүктесі арасындағы евклидтік қашықтық ретінде есептелді. Қозғалыс қауіпсіздігі бүкіл қозғалыс кезеңіндегі робот пен кедергілер арасындағы ең кіші қашықтық арқылы бағаланды.

Қайталама сандық модельдеу нәтижесінде локализацияның орташа квадраттық қателігі (RMSE) 0,0251 м, ал жоспарланған траекториядан орташа ауытқу 0,0451 м құрады. Қозғалыс барысында робот пен кедергілер арасындағы минималды қашықтық 0,6083 м деңгейінде сақталды. Алынған сандық нәтижелер көпсенсорлы ақпаратты біріктіру кезінде робот күйін бағалау қателігінің төмен деңгейде сақталатынын, нақты қозғалыс траекториясының жоспарланған маршрутқа жақын екенін және кедергілерді айналып өту кезінде қауіпсіз арақашықтықтың сақталатынын көрсетті.

Кесте 1 – Базалық және ұсынылған көпсенсорлы біріктіру әдістерін салыстыру

Көрсеткіш	Базалық әдіс	Ұсынылған әдіс
Сенсорлардың салмақ коэффициенттері	Тұрақты, $w_i=0,25$ $w_i=0,25$	Өлшеу дисперсиясына сәйкес бейімделетін
Локализация қателігі (RMSE), м	0,0308	0,0251
RMSE төмендеуі, %	–	18,5

Ұсынылған әдістің тиімділігін салыстырмалы бағалау үшін базалық көпсенсорлы біріктіру әдісі қарастырылды. Базалық нұсқада LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінің өлшеулеріне бірдей тұрақты салмақ коэффициенттері ($w_i=0,25$ $w_i=0,25$) берілді, ал ұсынылған әдісте салмақ коэффициенттері сенсорлық өлшеулердің ағымдағы дисперсиясына сәйкес бейімделіп отырды. Салыстыру бірдей модельдеу шарттары мен сенсорлық шу деңгейлерінде жүргізілді.

1-кестеде көрсетілгендей, базалық әдісте локализацияның орташа квадраттық қателігі 0,0308 м болса, ұсынылған әдісте бұл көрсеткіш 0,0251 м құрады. Осылайша, бейімделетін салмақ коэффициенттерін қолдану локализация RMSE мәнін базалық әдіспен салыстырғанда шамамен 18,5 %-ға төмендетті. Бұл нәтиже өлшеу белгісіздігі жоғары сенсорлардың қорытынды күй бағасына әсерін азайтып, сенімділігі жоғары сенсорлардың үлесін арттыру принципімен түсіндіріледі.

Салыстырмалы нәтижелер ұсынылған бейімделетін көпсенсорлы біріктіру тәсілінің тұрақты салмақ коэффициенттеріне негізделген базалық әдіске қарағанда робот күйін бағалау дәлдігін арттыратынын көрсетті. Алынған күй бағасының дәлдігінің артуы траекторияны жоспарлау және қозғалысты басқару модульдеріне берілетін навигациялық ақпараттың сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

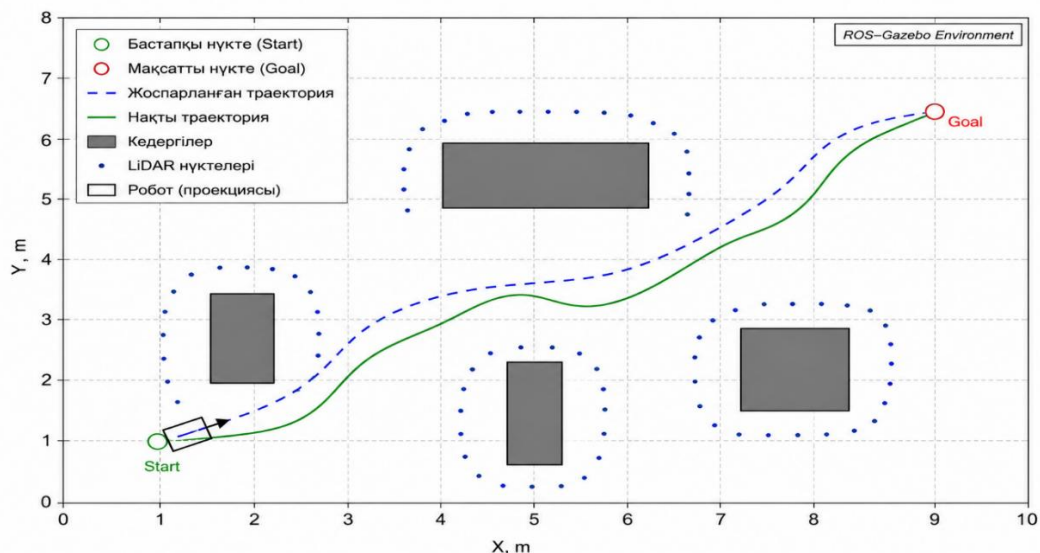
Модельдеу нәтижелері ұсынылған қауіпсіз навигация әдісінің жұмыс қабілеттілігін растады. Робот жоспарланған маршрутты тұрақты орындап, кедергілер анықталған жағдайда қозғалыс бағытын автоматты түрде қайта жоспарлады. Көпсенсорлы ақпаратты біріктіру роботтың орналасуын бағалау тұрақтылығын арттырып, жоспарланған траекториядан ауытқуды азайтуға мүмкіндік берді.

ROS–Gazebo ортасында тексеру нәтижелері.

Ұсынылған қауіпсіз навигация әдісінің жұмыс қабілеті ROS–Gazebo ортасында мобильді роботтың виртуалды моделі арқылы тексерілді. Модельдеу барысында LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінің виртуалды үлгілері пайдаланылып, сенсорлық мәліметтер ROS түйіндері арқылы өңделді. Роботтың бастапқы және мақсатты күйлері, сондай-ақ қозғалыс аймағындағы статикалық кедергілер MATLAB ортасында қолданылған сценарийге сәйкес берілді.

ROS–Gazebo ортасында сенсорлық мәліметтерді қабылдау, роботтың ағымдағы күйін бағалау, қауіпсіз траекторияны қалыптастыру және қозғалыс командаларын орындау үдерістері нақты уақыт режимінде жүзеге асырылды. Қозғалыс барысында қоршаған орта картасы үздіксіз жаңартылып, анықталған кедергілерге сәйкес маршрут қайта жоспарланып отырды. Бұл тәсіл жоспарланған траекторияны сақтай отырып, роботтың қауіпсіз қозғалысын қамтамасыз етуге мүмкіндік берді. Кедергі қозғалыс бағытына жақын орналасқан жағдайда траектория қайта есептеліп, робот қауіпсіз маршрут бойынша қозғалысын жалғастырды.

Ұсынылған алгоритмнің ROS–Gazebo ортасындағы жұмыс нәтижесі 3-суретте көрсетілген.



Сурет 3 – ROS–Gazebo ортасында мобильді роботтың қауіпсіз навигациясын модельдеу нәтижесі

3-суреттен ұсынылған қауіпсіз навигация алгоритмінің ROS–Gazebo ортасында тұрақты жұмыс істегені байқалады. Мобильді робот бастапқы нүктеден мақсатты орынға дейін қозғалу барысында статикалық кедергілерді қауіпсіз айналып өтіп, жоспарланған маршрут бойынша қозғалысын сақтады. Жоспарланған және нақты траекториялардың өзара жақын орналасуы басқару алгоритмінің тұрақтылығын көрсетті. Сонымен қатар LiDAR сенсорынан алынған мәліметтер қоршаған ортадағы кедергілерді уақытылы анықтауға мүмкіндік берді, ал көпсенсорлы ақпаратты біріктіру алгоритмі роботтың орналасуын сенімді бағалап, қозғалыс бағытын нақты уақыт режимінде түзетуді қамтамасыз етті.

ROS–Gazebo ортасындағы тексеру MATLAB ортасында қарастырылған модельдеу сценарийінің бағдарламалық-роботтық ортада орындалу мүмкіндігін бағалау мақсатында жүргізілді. Сандық бағалау нәтижелері бойынша локализацияның орташа квадраттық қателігі (RMSE) 0,0251 м, жоспарланған траекториядан орташа ауытқу 0,0451 м, ал робот пен кедергілер арасындағы минималды қашықтық 0,6083 м құрады. ROS–Gazebo ортасындағы модельдеу осы көрсеткіштермен сипатталған қозғалыс режимінің бағдарламалық ортада да тұрақты орындалатынын сапалық тұрғыдан растады. Алгоритмнің орындалу уақыты пайдаланылатын есептеу платформасының аппараттық сипаттамаларына және бағдарламалық ортаның конфигурациясына тәуелді болғандықтан, осы жұмыста жеке сандық көрсеткіш ретінде бағаланбады.

Қорытынды.

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде көпсенсорлы ақпарат негізінде мобильді роботтандырылған платформаның қауіпсіз навигациясын жетілдіруге арналған әдіс ұсынылды. Әзірленген әдісте LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінен алынған мәліметтер біріктіріліп, роботтың ағымдағы күйін бағалау және қауіпсіз қозғалыс траекториясын қалыптастыру жүзеге асырылды.

Әдістің тиімділігі сандық модельдеу нәтижелері негізінде бағаланып, ұсынылған навигациялық алгоритмнің жұмыс қабілеті ROS–Gazebo бағдарламалық ортасында қосымша тексерілді. Модельдеу нәтижелері мобильді роботтың жоспарланған маршрут бойынша тұрақты қозғалып, статикалық кедергілерді қауіпсіз айналып өтетінін көрсетті.

Зерттеу нәтижелері ұсынылған әдістің мобильді роботтандырылған платформалардың қауіпсіз автономды навигация жүйелерінде қолдануға жарамды екенін

көрсетті. Әзірленген тәсіл өндірістік автоматтандыруда, қоймалық логистикада, интеллектуалды көлік жүйелерінде және сервистік робототехникада автономды мобильді роботтарды басқару жүйелерін әзірлеуге негіз бола алады.

Болашақ зерттеулерде ұсынылған әдісті динамикалық орта жағдайында жетілдіру, сыртқы шуылдардың әсерін тереңірек зерттеу, сондай-ақ нақты мобильді робот платформасында эксперименттік тексеру жоспарлануда.

Әдебиеттер

1. Bailey, T., & Durrant-Whyte, H. (2006). Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(3), 108–117.
2. Corke, P. (2017). *Robotics, vision and control: Fundamental algorithms in MATLAB* (2nd ed.). Springer.
3. Durrant-Whyte, H., & Bailey, T. (2006). Simultaneous localization and mapping: Part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(2), 99–110.
4. Fan, Z., Zhang, L., Wang, X., Shen, Y., & Deng, F. (2025). LiDAR, IMU, and camera fusion for simultaneous localization and mapping: A systematic review. *Artificial Intelligence Review*, 58, Article 174. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11187-w>
5. Filipenko, M., & Afanasyev, I. (2018). Comparison of various SLAM systems for mobile robot in an indoor environment. In *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)* (pp. 400–407). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IS.2018.8710464>
6. Jiao, J., Wei, H., Hu, T., Hu, X., Zhu, Y., He, Z., Wu, J., Yu, J., Xie, X., Huang, H., Geng, R., Wang, L., & Liu, M. (2022). FusionPortable: A multi-sensor campus-scene dataset for evaluation of localization and mapping accuracy on diverse platforms. In *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 3851–3856). IEEE.
7. LaValle, S. M. (2006). *Planning algorithms*. Cambridge University Press.
8. Al-Tawil, B., Candemir, A., Jung, M., & Al-Hamadi, A. (2025). Mobile robot navigation with enhanced 2D mapping and multi-sensor fusion. *Sensors*, 25(8), 2408. <https://doi.org/10.3390/s25082408>
9. Qin, C., Ye, H., Pranata, C. E., Han, J., Zhang, S., & Liu, M. (2020). LINS: A LiDAR-inertial state estimator for robust and efficient navigation. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 8899–8906). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9197567>
10. Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R., & Ng, A. Y. (2009). ROS: An open-source robot operating system. In *ICRA Workshop on Open Source Software*.
11. Rahman, M. M., Mahmud, J. A., Ali, M. F., Rahim, M. A., Sarker, S. K., & Yan, B. (2026). ROS2-based real-time autonomous mapping and navigation: Integrating visual SLAM and sensor fusion with performance analysis under varying light. *Measurement*, 268, 120695. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2026.120695>
12. Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2016). *Springer handbook of robotics* (2nd ed.). Springer.
13. Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots* (2nd ed.). MIT Press.
14. Spiess, F., Friesslich, J., Kaupp, T., Kounev, S., & Strobel, N. (2020). Survey and experimental comparison of RGB-D indoor robot navigation methods supported by ROS and their expansion via fusion with wheel odometry and IMU data. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 9(12), 1532–1540.
15. Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2000). *Probabilistic robotics*. MIT Press.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БЕЗОПАСНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ОСНОВЕ МНОГОСЕНСОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. В работе предложен метод повышения безопасности автономной навигации мобильной роботизированной платформы на основе объединения многосенсорной информации. Цель исследования заключается в надежной оценке положения робота и формировании безопасной траектории движения с учетом препятствий путем интеграции данных, получаемых от LiDAR, RGB-камеры, инерциального измерительного модуля (IMU) и энкодеров колес. Предлагаемый метод объединяет в единую систему динамическую модель мобильной платформы, алгоритм слияния многосенсорных данных, модуль оценки окружающей среды, планирование безопасной траектории и управление движением в реальном времени. Динамическая модель учитывает параметры движения робота, угловые скорости колес и управляющие воздействия. На основе объединенной сенсорной информации определяется текущее положение и состояние движения робота, после чего данные передаются в систему планирования траектории и управления. При формировании безопасного маршрута учитывается минимальное расстояние между роботизированной платформой и препятствиями, что позволяет определить направление движения с пониженным риском столкновения. Эффективность метода оценивалась в средах моделирования MATLAB и ROS–Gazebo. В ходе экспериментов исследовалось движение робота по заданному маршруту, обнаружение статических препятствий и их безопасный обход. Дополнительно в сенсорные данные вносился внешний шум для оценки устойчивости предложенного подхода к измерительным ошибкам. Результаты показали, что объединение многосенсорной информации повышает устойчивость оценки положения робота, обеспечивает стабильное отслеживание траектории и способствует повышению безопасности навигации. Предложенный метод может применяться при разработке автономных навигационных систем мобильных роботов для промышленной автоматизации, складской логистики и сервисной робототехники.

Ключевые слова: мобильная роботизированная платформа, безопасная навигация, объединение многосенсорной информации, LiDAR, RGB-камера, IMU, энкодер колеса, динамическая модель, планирование траектории, ROS–Gazebo.

IMPROVEMENT OF SAFE NAVIGATION FOR A MOBILE ROBOTIC PLATFORM BASED ON MULTI-SENSOR INFORMATION

Abstract. This study presents a method for improving the safety of autonomous navigation of a mobile robotic platform through multi-sensor data fusion. The main objective is to reliably estimate the robot's position and generate a safe motion trajectory in the presence of obstacles by integrating data obtained from LiDAR, an RGB camera, an inertial measurement unit (IMU), and wheel encoders. The proposed method integrates the dynamic model of the mobile platform, a multi-sensor data fusion algorithm, an environmental assessment module, safe trajectory planning, and real-time motion control within a unified framework. The dynamic model accounts for the robot's motion parameters, wheel angular velocities, and control inputs. Based on the fused sensor information, the current position and motion state of the robot are estimated, and the resulting data are transferred to the trajectory planning and control system. During safe trajectory generation, the minimum distance between the robotic platform and surrounding obstacles is considered to determine a motion direction with a reduced risk of collision. The effectiveness of the proposed method was evaluated using MATLAB and ROS–Gazebo simulation environments. The experiments investigated the robot's motion along a predefined route, detection of static obstacles, and their safe avoidance. In addition, external noise was introduced into the sensor

measurements to evaluate the robustness of the proposed approach to measurement errors. The results demonstrated that multi-sensor data fusion improves the stability of robot position estimation, enables consistent trajectory tracking, and contributes to safer autonomous navigation. The proposed method can be applied to the development of autonomous navigation systems for mobile robots in industrial automation, warehouse logistics, and service robotics.

Keywords: mobile robotic platform, safe navigation, multi-sensor data fusion, LiDAR, RGB camera, IMU, wheel encoder, dynamic model, trajectory planning, ROS–Gazebo.

Сведение об авторах

Жәрдемқызы Салтанат	Магистр, сеньор-лектор кафедры «Организация авиационных перевозок и логистика» Академия Гражданской Авиации, E-mail: s.zhardemqyzy@agakaz.kz
Бактыбаев Мурат Кыргызбаевич	К.ф.м.н. - Институт автоматизации и информационных технологий Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), Email: murat.baktybayev@gmail.com
Алимбаев Чингиз Абдраимович	Ph.D, ассоц. профессор - Институт автоматизации и информационных технологий Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), E-mail: c.alimbayev@satbayev.university
Бердибаева Гульмира Куанышбаевна	Ph.D, ассоц. профессор - Институт автоматизации и информационных технологий Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), Email: g.berdibayeva@satbayev.university

Авторлар туралы мәлімет

Жәрдемқызы Салтанат	Магистр, «Әуе тасымалдарын ұйымдастыру және логистика» кафедрасының сеньор-лекторы. Азаматтық авиация академиясы, E-mail: s.zhardemqyzy@agakaz.kz
Бактыбаев Мурат Кыргызбайұлы	Ф.м.ғ.к., - Автоматика және ақпараттық технологиялар институты Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасы Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (ҚазҰТЗУ) E-mail: murat.baktybayev@gmail.com
Алимбаев Чингиз Абдраимович	Ph.D., қауымдастырылған профессор - Автоматика және ақпараттық технологиялар институты. Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасы Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (ҚазҰТЗУ) E-mail: c.alimbayev@satbayev.university
Бердибаева Гульмира Куанышбаевна	Ph.D., қауымдастырылған профессор - Автоматика және ақпараттық технологиялар институты. Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасы Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (ҚазҰТЗУ) E-mail: g.berdibayeva@satbayev.university

Information about the authors

Saltanat Zhardemkyzy	Master's Degree, Senior Lecturer, Department of Air Transportation Organization and Logistics. Academy of Civil Aviation. E-mail: s.zhardemqyzy@agakaz.kz
Murat Kyrgyzbayevich Baktybayev	Candidate of Physical and Mathematical Sciences - Institute of Automation and Information Technologies. Department of Robotics and Technical Means of Automation Satbayev University. E-mail: murat.baktybayev@gmail.com
Shyngys Abdraimovich Alimbayev	Ph.D, Associate Professor - Institute of Automation and Information Technologies Department of Robotics and Technical Means of Automation Satbayev University. E-mail: c.alimbayev@satbayev.university
Gulmira Kuanyshevna Berdibayeva	Ph.D, Associate Professor - Institute of Automation and Information Technologies Department of Robotics and Technical Means of Automation Satbayev University. E-mail: g.berdibayeva@satbayev.university



КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР, АСПАП ЖАСАУ ЖӘНЕ АВТОМАТТАНДЫРУ
COMPUTER SCIENCE, INSTRUMENTATION AND AUTOMATION

ӘОЖ 004.8

ҒТАХА 28.23.00

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_15

Д.С. Абраймова¹, С.А. Нургалиева^{2*}, Ж.О. Башеева², Ш.С. Туткышбаева²,
 А.Р.Сыздықпаева³

¹С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан

²Astana IT university, Астана, Қазақстан

³С.Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен, Қазақстан

*E-mail: symbat.nurgaliyeva@astanait.edu.kz

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕГІ МАНСАПТЫҚ ҰСЫНЫМ
ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ӨНІМДІЛІГІ: ЖҮЙЕЛІ ШОЛУ

***Аңдатпа.** Еңбек нарығының жылдам өзгеруі және білім беру деректерінің қолжетімділігінің артуы жағдайында жасанды интеллект (ЖИ) негізіндегі мансаптық ұсыным жүйелерін әзірлеу өзекті бағыттардың біріне айналды. Алайда деректер түрлері мен алгоритмдерді таңдау ерекшеліктерінің модельдердің болжамдық дәлдігі мен есептеу тиімділігіне әсері жеткілікті деңгейде жүйеленбеген. Осы зерттеудің мақсаты – ЖИ негізіндегі мансаптық ұсыным жүйелеріне арналған заманауи зерттеулерді жүйелеу және деректер түрлері, алгоритмдер мен бағалау көрсеткіштері арасындағы байланысты анықтау. Зерттеу PRISMA 2020 әдіснамасы негізінде жүргізілген жүйелі шолуға сүйенеді. Талдау «деректер түрі-алгоритм-бағалау көрсеткіші» байланысы тұрғысынан орындалды. Нәтижелер қарастырылған зерттеулерде жіктеу міндеттерінің басым екенін (56%) және құрылымдалған кестелік деректердің ең жиі қолданылатынын (76%) көрсетті. Ең жоғары болжамдық дәлдік негізінен ансамбльдік және нейрондық желі модельдерінде байқалды. Сонымен қатар зерттеулердің көпшілігінде есептеу тиімділігі жүйелі түрде бағаланбайтыны анықталды: жұмыстардың 76%-ында бұл көрсеткіштер қарастырылмаған. Бұдан басқа, алгоритмдерді таңдау көбіне пайдаланылатын деректер түрлерімен байланысты екені көрсетілді. Зерттеу нәтижелері мансаптық ұсыным жүйелеріндегі алгоритмдік тәсілдерді жүйелеуге мүмкіндік береді және болашақ зерттеулер үшін бағалау хаттамаларын стандарттау, есептеу тиімділігін жүйелі есепке алу және мультимодальды деректерді кеңінен пайдалану қажеттігін көрсетеді. Сонымен қатар ұлттық еңбек нарығы мен білім беру ерекшеліктеріне бейімделген ЖИ негізіндегі ұсыным жүйелерін дамыту өзекті бағыт болып табылады.*

***Түйін сөздер:** жасанды интеллект, мансаптық ұсыным жүйесі, деректер түрлері, машиналық оқыту алгоритмдері, болжамдық дәлдік, есептеу тиімділігі.*

Кіріспе.

Қазіргі таңда жасанды интеллект (ЖИ) негізіндегі жүйелер білім беру және еңбек нарығы салаларында кеңінен қолданылып, жеке тұлғаның ерекшеліктері мен әртүрлі деректер көздерін ескере отырып, оқыту және кәсіби бағдар беру бойынша дербестендірілген ұсынымдар жасауға мүмкіндік беруде. Дәстүрлі мансаптық бағдарлау құралдарымен салыстырғанда, ЖИ жүйелері анағұрлым дәл және бейімделген шешімдер ұсынғанымен, кәсіп таңдау сияқты маңызды өмірлік шешімдерде олардың болжамдық

дәлдігімен қатар алгоритмдердің ашықтығы, түсіндірілетіндігі және тиімділігін бағалау мәселелері де ерекше маңызға ие.

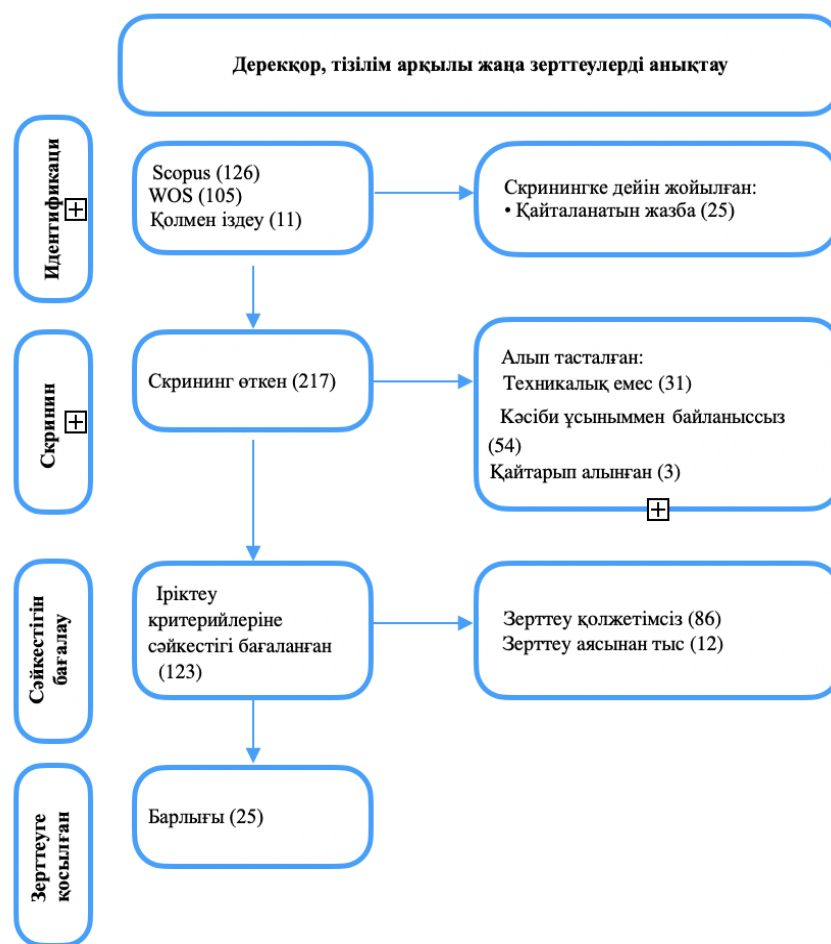
Қазіргі уақытта жасанды интеллект негізіндегі мансаптық бағдарлау жүйелеріне арналған зерттеулер алгоритмдік тәсілдердің кең ауқымын қамтиды. Олардың қатарында бақылаулы оқытудың дәстүрлі әдістері, ұсынымдық жүйелер және гибридтік модельдер бар. Мұндай әртүрлілік мансаптық ұсынымдар саласына арналған жүйелі шолу зерттеулерінде де көрсетілген [1]. Қолданбалы зерттеулерде білім беру траекториясын болжау мен мансаптық ұсынымдар қалыптастыру үшін классикалық машиналық оқыту модельдерімен қатар құрылымдалмаған мәтіндерді өңдеуге негізделген заманауи NLP тәсілдері де кеңінен қолданылады [2]. Дегенмен, зерттеулерде әртүрлі міндет қойылымдары мен бағалау көрсеткіштері пайдаланылатындықтан, алынған нәтижелерді бірыңғай дәлелдік қор ретінде қарастыру қиын [3]. Осыған байланысты алгоритмдердің тиімділігін тікелей салыстыру әдіснамалық тұрғыдан әрдайым дұрыс бола бермейді [4]. Сонымен қатар нәтижелерді ұсыну тәсілдерінің біркелкі болмауы, әсіресе ұсынымдық және гибридтік жүйелерде қолданылатын көрсеткіштердің айырмашылығы, сандық жинақтауды шектейді. Мұндай әдіснамалық әртектілік зерттеулерді салыстыруды күрделендіріп, сипаттамалық синтез жүргізудің қажеттілігін арттырады. Сондықтан бұл жұмыстың негізгі мақсаты қолданыстағы тәсілдерді сипаттау ғана емес, жоғары әдіснамалық жағдайында олардың нәтижелерін жүйелі түрде синтездеу болып табылады.

Бұл зерттеудің мақсаты – жасанды интеллект негізіндегі мансаптық ұсыным жүйелеріне арналған ғылыми еңбектерді жүйелі түрде талдау арқылы әртүрлі міндет қойылымдары аясында ең жоғары болжамдық дәлдік пен тиімділікті көрсететін алгоритмдерді анықтау. Зерттеудің негізгі үлестері: (1) мансаптық бағдарлау саласындағы ЖИ-зерттеулердің деректер базасын қалыптастыру және оларды міндеттері, алгоритмдері мен бағалау көрсеткіштері бойынша жіктеу; (2) алгоритмдерді салыстырмалы талдауға мүмкіндік беретін кластерлеу тәсілін ұсыну; (3) алынған нәтижелерді жүйелі синтездеу; (4) зерттеулердегі шектеулер мен олқылықтарды анықтап, болашақ зерттеулерге арналған ұсыныстарды тұжырымдау. Осы мақсатқа жету үшін келесі зерттеу сұрақтары қарастырылды:

1. ЖИ негізіндегі мансаптық ұсыным жүйелерінде машиналық және терең оқытудың қандай алгоритмдері ең жоғары болжамдық дәлдікті көрсетеді?
2. Машиналық және терең оқыту алгоритмдерінің қайсысы есептеу тиімділігі бойынша жоғары нәтижелерге қол жеткізеді?
3. Мансаптық ұсыным модельдерінде қандай деректер түрлері пайдаланылады және олардың алгоритмдерді таңдау мен өнімділік көрсеткіштеріне әсері қандай?

Материалдар мен зерттеу әдістері.

Жүйелі әдебиет шолуы PRISMA 2020 нұсқаулығына сәйкес жүргізілді [5]. Зерттеу әдістемесі зерттеу сұрақтарын қалыптастыру, іздеу стратегиясын әзірлеу, зерттеулерді іріктеу, сапасын бағалау және нәтижелерді синтездеу кезеңдерін қамтиды. Әдебиеттерді іздеу Scopus және Web of Science деректер қорларында жүзеге асырылды. Зерттеулерді іріктеу екі кезеңнен тұрды: бастапқы кезеңде жарияланымдардың атаулары мен аңдатпалары қарастырылса, кейінгі кезеңде толық мәтіндер талданды. Алып тастау себептері PRISMA талаптарына сәйкес құжатталды (1-сурет).



Сурет 1 – Зерттеулерді іріктеу үдерісінің сызбасы (2021–2025)

Іздеу стратегиясы және деректер көздері. Зерттеу барысында әрбір енгізілген жұмыс үшін «деректер түрі – алгоритм – бағалау көрсеткіші» арасындағы байланыс тіркелді. Мұндай тәсіл нәтижелерді нақты міндеттер контекстінде талдауға және зерттеулердің әдіснамалық әртекстілігі жағдайында деректерді жүйелі түрде синтездеуге мүмкіндік берді.

Ғылыми жарияланымдарды іздеу алдын ала әзірленген стратегия негізінде Scopus және Web of Science деректер қорларында жүргізілді. Іздеу кезеңі 2021 жылдан 2025 жылдың қарашасына дейінгі уақыт аралығын қамтыды. Ғылыми жарияланымдарды іздеу барысында жасанды интеллект технологияларын сипаттайтын «artificial intelligence», «AI», «machine learning», «deep learning», «neural network», «recommender system» және «decision support system» сияқты кілттік сөздер пайдаланылды. Мансаптық бағдарлау саласын қамту үшін «career guidance», «career recommendation», «career counseling», «career planning» және «career development» терминдері қолданылды. Іздеу сұраныстары аталған терминдердің әртүрлі комбинациялары негізінде қалыптастырылды. Іріктеу Computer Science және Engineering пәндік салаларындағы ағылшын тілінде жарияланған мақалалар мен конференция материалдарымен шектелді. Негізгі іздеуден бөлек, толық мәтіндік сараптаудан өткен мақалалардың әдебиеттер тізімдерін талдау арқылы қосымша қолмен іздеу жүргізілді. Бұл тәсіл бастапқы іздеу барысында анықталмаған, бірақ зерттеу тақырыбына сәйкес келетін жарияланымдарды қамтуға мүмкіндік берді.

Қосу және алып тастау өлшемшарттары. Шолуға мансаптық ұсыным жүйелерінде жасанды интеллект алгоритмдерін қолданатын және пайдаланылған әдістер, деректер жиынтықтары немесе бағалау көрсеткіштері туралы ақпарат беретін зерттеулер енгізілді. Ал ЖИ әдістерін қолданбайтын педагогикалық немесе психологиялық зерттеулер,

мансаптық ұсыным жүйелерімен байланысты емес жарияланымдар, сондай-ақ шолу мақалалары, кері қайтарылған жұмыстар, толық мәтіні қолжетімсіз материалдар және 2021 жылға дейін жарияланған зерттеулер талдаудан шығарылды.

Сүзгілеу және іріктеу процесі. Зерттеулерді іріктеу PRISMA-2020 ұсынымдарына сәйкес бірнеше кезеңде жүргізілді [5]. Алдымен қайталанатын жарияланымдар алынып тасталды. Кейін жұмыстардың атаулары мен аңдатпалары қосу және алып тастау өлшемшарттарына сәйкестігі тұрғысынан бағаланды. Соңғы кезеңде толық мәтіндерге талдау жүргізіліп, олардың зерттеу сұрақтарына және әдіснамалық сапа талаптарына сәйкестігі тексерілді.

Деректерді алу. Деректерді жинау зерттеу сұрақтарына бағытталған арнайы әзірленген хаттама негізінде жүргізілді. Бұл зерттеуде алынатын айнымалылар жиынтығы болжам дәлдігін, есептеу тиімділігін және қолданылған деректер түрлерін талдауға бағдарланды. Құрылымдық талдау жүргізу мақсатында әрбір енгізілген зерттеуге бірегей код (S01–S25) берілді. Деректерді алу жартылай құрылымдалған кесте арқылы жүзеге асырылып, барлық ақпарат кейінгі талдау үшін жинақтаушы деректер қорына енгізілді. Алынған деректердің қорытынды құрылымы 1-кестеде көрсетілген.

Кесте 1 – Мансаптық ұсыным жүйелері бойынша зерттеулердің алгоритмдік кластерлер бойынша жіктелуі

Зерттеу коды	Библиографиялық сипаттама	Кластер
S01	Islam R., Keya K., Zeng Z., Pan S., Foulds J. (2021). Debiasing Career Recommendations with Neural Fair Collaborative Filtering	Кластер 4
S02	Mejia M., Jimenez C., Martínez-Santos J. (2021). Career Recommendation System for Validation of Multiple Intelligence to High School Students	Кластер 1
S03	Guo P., Xiao K., Ye Z., Zhu H., Zhu W. (2022). Intelligent Career Planning via Stochastic Subsampling Reinforcement Learning	Кластер 5
S04	Huang L. (2022). The Establishment of College Student Employment Guidance System Integrating Artificial Intelligence and Civic Education	Кластер 3
S05	Wang C., Wang K., et al. (2022). Do Humans Prefer Debaised AI Algorithms? A Case Study in Career Recommendation	Кластер 4
S06	Guo J., Qi L. (2022). Visualization Research of College Students' Career Planning Paths Integrating Deep Learning and Big Data	Кластер 2
S07	Fatima N., Gul S., Ahmed J., Khand Z., Mujtaba G. (2022). A Rule-Based Machine Learning Model for Career Selection through MBTI Personality	Кластер 1
S08	Wang Y., Yang L., Wu J., Song Z., Shi L. (2022). Mining Campus Big Data: Prediction of Career Choice Using Interpretable Machine Learning Method	Кластер 1
S09	Majjate H., Bellarhmouch Y., Jeghal A., Yahyaouy A., Tairi H., Zidani K. (2024). AI-Powered Academic Guidance and Counseling System Based on Student Profile and Interests	Кластер 1
S10	Byeon H. (2024). A Feature Interaction Based Neural Network Approach: Predicting Job Turnover in Early Career Graduates in South Korea	Кластер 2
S11	Gülten H., Baraçlı H. (2024). A Machine Learning-Based Forecast Model for Career Planning in Human Resource Management: A Case Study of the Turkish Post Corporation	Кластер 1

S12	Abdalkareem M., Min-Allah N. (2024). Explainable Models for Predicting Academic Pathways for High School Students in Saudi Arabia	Кластер 1
S13	Liu P. (2024). Research on the Path of Enhancing Employment and Entrepreneurship Ability of Deaf College Students Based on Knowledge Graph	Кластер 4
S14	Feng K. (2024). Research on College Students' Career Planning and Employment Guidance Strategies Assisted by Artificial Intelligence	Кластер 4
S15	Chen Y., Wei W., Wang L., Dong Y., Liang C. (2024). Where Do They Go Next? Causal Inference-Based Prediction and Visual Analysis of Graduates' First Destination	Кластер 3
S16	Mahboob K., Asif R., Haider N. (2024). Career Planning Matters: Intelligence-Based Career Path Predictions Using Data Mining Models – A Longitudinal Study	Кластер 2
S17	Seesukong S., Angskun T., Keandoungchun N., Thippongtorn A., Angskun J. (2024). CARIA: A Personalized Career Recommender Based on Individual Competency Similarity Measure	Кластер 5
S18	Zhang L., Gu X. (2025). A Novel Career Prediction Method Based on Fuzzy Model–Fuzzy Clustering Approach	Кластер 5
S19	Agrawal R., Nayak A., Hemnani P., et al. (2025). Predicting AI Job Market Dynamics: A Data Mining Approach to Machine Learning Career Trends on Glassdoor	Кластер 1
S20	Moreno-Novoa M., Puertas E., Martinez-Santos J. (2024). Enhancing Vocational Guidance with Machine Learning: Predicting STEM Career Viability for High School Students	Кластер 1
S21	Cheng Y. (2025). Development of a Career Planning Assistance Platform for College Students Combining Fuzzy Logic and Deep Learning	Кластер 3
S22	El-Keiey S., ElMenshawry D., Hassanein E. (2025). Career Recommendation Based on Feature Selection for Undergraduate Students Using Machine Learning Techniques	Кластер 1
S23	Hassan R., Hassan M., Sameem M., Rafique M. (2024). Personality-Aware Course Recommender System Using Deep Learning for Technical and Vocational Education and Training	Кластер 2
S24	Senger E., Campbell Y., van der Goot R., Plank B. (2025). Toward More Realistic Career Path Prediction: Evaluation and Methods	Кластер 2
S25	Faruque S.H., Sharun K., Akter S. (2025). Decision Support System to Reveal Future Career over Students' Survey Using Explainable AI	Кластер 2

Нәтижелер және оларды талқылау.

Енгізілген зерттеулердің әдіснамалық сапасын бағалау (Quality Assessment (QA)) үшін зерттеу мақсаттарына бейімделген төрт критерийден тұратын арнайы сапаны бағалау сызбасы қолданылды [6]. Бағалау нәтижелері 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2 – Енгізілген зерттеулердің сапасын бағалау нәтижелері

Зерттеу коды	QA1	QA2	QA3	QA4	Жалпы балл
S01	1	1	1	1	4
S02	1	0	1	1	3
S03	1	1	0	1	3

S04	1	0	1	1	3
S05	1	0	1	1	3
S06	1	1	1	1	4
S07	1	0	1	1	3
S08	1	1	1	1	4
S09	1	0	1	1	3
S10	1	1	1	1	4
S11	1	1	1	1	4
S12	1	1	1	1	4
S13	1	1	1	1	4
S14	1	1	1	1	4
S15	1	0	1	1	3
S16	1	0	1	1	3
S17	1	0	1	1	3
S18	1	1	1	1	4
S19	1	0	1	1	3
S20	1	0	1	1	3
S21	1	0	1	1	3
S22	1	0	1	1	3
S23	1	0	1	1	3
S24	1	1	1	1	4
S25	1	1	1	1	4

Ескерту:

QA1 – алгоритмнің сипатталуы;

QA2 – есептеу тиімділігі туралы ақпараттың болуы;

QA3 – болжам дәлдігі туралы ақпараттың болуы;

QA4 – деректер түрінің сипатталуы.

Жоғарыдағы кестеде көрсетілгендей, сапаны бағалау нәтижелері бойынша зерттеулердің 48%-ы (n=12) барлық төрт критерийге сәйкес келіп, жоғары сапа санатына жатқызылды. Тағы 48%-ы (n=12) орташа сапа деңгейін көрсетті. Тек бір зерттеу (4%, S03) төмен балл алды, бұл онда болжам дәлдігіне қатысты ақпараттың болмауымен байланысты. Алайда бұл нәтиже зерттеудің жалпы ғылыми сапасын емес, оның осы жұмыста қолданылған сапаны бағалау критерийлеріне сәйкестік деңгейін ғана сипаттайды.

Зерттеу нәтижелері «деректер түрі – алгоритм – бағалау көрсеткіші» байланысы негізінде ұсынылды, себебі модельдердің өнімділігі қолданылған деректердің сипаты мен зерттеу міндеттеріне тікелей тәуелді.

Зерттеулердің сипаттамалары. Жарияланымдардың географиялық таралуы жасанды интеллект негізіндегі мансаптық кеңес беру саласындағы зерттеулердің жекелеген елдерде шоғырланғанын көрсетті. Ең көп зерттеу Қытайда жүргізілген (n=11), бұл елдің аталған бағыттағы жетекші орнын айғақтайды. АҚШ, Германия, Колумбия, Пәкістан және Мароккодан екі зерттеуден анықталса, Бангладеш, Үндістан, Тайланд, Сауд Арабиясы, Түркия, Оңтүстік Корея, Италия, Ұлыбритания және Египеттен бір-бір жарияланым ғана табылды. Ал шолуға енгізілген зерттеулер арасында Қазақстан авторларының жұмыстары кездеспеді. Бұл жағдай елімізде ЖИ негізіндегі мансаптық ұсыным жүйелері бойынша зерттеулердің жеткіліксіз дамығанын көрсетеді және білім беру жүйесі мен еңбек нарығының цифрлық трансформациясы жағдайында маңызды зерттеу олқылығы ретінде қарастырылуы мүмкін.

Мазмұндық талдаудың тақырыптық нәтижелері. Бұл бөлімде зерттеулердің негізгі сипаттамалары мен зерттеу сұрақтарына сәйкес алынған нәтижелер ұсынылады. Іріктелген

жұмыстарда қолданылған алгоритмдер оқыту парадигмаларының ерекшеліктеріне қарай бес тұжырымдамалық кластерге жіктелді. Мұндай топтастыру зерттеулердің жалпы корпусын жүйелеуге және алгоритмдерді салыстырмалы түрде талдауға мүмкіндік берді (3-кесте).

Кесте 3 – Мансаптық ұсыным жүйелерінде қолданылатын алгоритмдердің оқыту парадигмалары бойынша жіктелуі

Кластер нөмері	Кластер атауы	Ең жоғары нәтижені көрсеткен алгоритмдер
Кластер 1	Classical & Ensemble Machine Learning	Logistic Regression, SVM, KNN, Huber Regressor Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost
Кластер 2	Deep Neural Networks	MLP, CNN, LSTM, FINN, TVET-CRS model
Кластер 3	Hybrid & Multimodal Deep Learning	GRU+MLP+attention, CIRF-MLP, CNN+LSTM+Transformer
Кластер 4	ML-based Recommender Systems	Feature-based & Time-aware Hybrid Collaborative Filtering Neural CF NFCF Hybrid CF + KG + clustering + TF-IDF + time-decay
Кластер 5	Non-comparable AI Paradigms	Reinforcement Learning–based methods (SSSRL с Q-learning) Fuzzy Logic & Soft Computing Systems (Takagi–Sugeno type + FCM + LSE) Similarity-based / Distance-based Methods (MES)

Іріктелген зерттеулерді талдау барысында әрбір жұмыста авторлар ұсынған әдістеме шеңберінде ең жоғары нәтижеге қол жеткізген алгоритмдер анықталды. Алайда бұл нәтижелер нақты деректер жиынтықтары мен зерттеу жағдайларына тәуелді болғандықтан, белгілі бір алгоритмнің әмбебап артықшылығын білдірмейді.

Талдау зерттеу сұрақтарына сәйкес үш бағыт бойынша жүргізілді: (1) шешілетін міндеттер мен қолданылған бағалау көрсеткіштері; (2) алгоритмдердің есептеу тиімділігі; (3) кіріс деректерінің түрлері және олардың алгоритмдерді таңдау мен өнімділік нәтижелерімен байланысы. Нәтижелер міндеттер мен бағалау көрсеткіштері бойынша ұсынылса, кластерлер арасындағы ұқсастықтар мен айырмашылықтар талқылау бөлімінде қарастырылды.

Бірінші зерттеу сұрағына сәйкес, зерттеулерде ұсынылған алгоритмдердің болжамдық дәлдік көрсеткіштері салыстырылып, әр жұмыста ең жоғары нәтиже көрсеткен модельдер анықталды. Алынған нәтижелер алгоритмдік кластерлер бойынша жүйеленді:

а) Жіктеу. Жіктеу міндеттерінде ең жоғары нәтижелерді ансамбльдік машиналық оқыту әдістері мен терең оқыту модельдері көрсетті. Кластер 1 зерттеулерінде Random Forest моделі Accuracy = 99% және AUC = 99.97% (S12), ал Gradient Boosting Accuracy = 0.978 және AUC = 0.983 (S11) мәндеріне қол жеткізді. Терең оқыту модельдері арасында CNN Mean Accuracy = 93.75% және AUC-ROC = 99.02% (S25), ал MLP моделі 95.73% дәлдік көрсетті (S16) (Кластер 2). Сонымен қатар гибридік тәсілдер де жоғары нәтижелер берді: CIRF-MLP моделі Accuracy = 0.87 және AUC = 0.95 (S15) (Кластер 3) көрсетсе, Feature-based & Time-aware Hybrid Collaborative Filtering моделі AUC көрсеткіші бойынша 95%-дан жоғары нәтижеге жетті (S14) (Кластер 4). Жалпы алғанда, жіктеу міндеттерінде ансамбльдік әдістер мен нейрондық желілер ең жоғары болжамдық дәлдікті көрсетті.

б) Ұсынымдарды дәрежелену. Ұсынымдарды дәрежелену міндеттерінде зерттеулер әртүрлі бағалау көрсеткіштерін қолданғандықтан нәтижелерді тікелей салыстыру қиын болды. Ең жиі кездескен көрсеткіштердің бірі NDCG болып табылады. Осы көрсеткіш бойынша TVET-CRS моделі $NDCG = 0.96$ нәтижесін көрсетті (S23). NCFCF моделі үшін NDCG шамамен 0.48 (S01), ал NCF+LR моделі үшін $NDCG = 0.0050$ (S05) болды. Басқа зерттеулерде Precision@K (S17), HR және NDCG (S01), сондай-ақ MRR және Recall@K (S24) көрсеткіштері пайдаланылды. Сондықтан бұл санаттағы нәтижелер көрсеткіштердің әртүрлілігіне байланысты сипаттамалық түрде жинақталды.

в) Регрессия міндеттері. Регрессиялық міндеттерде модельдердің тиімділігі қателік көрсеткіштері мен детерминация коэффициенті арқылы бағаланды. Ең төмен қателік көрсеткіштерінің бірі Huber Regressor моделінде байқалды ($MSE = 0.0017$, $RMSE = 0.0422$) (S09). Random Forest моделі $RMSE = 0.0646$ және $NRMSE = 0.1966$ мәндерін көрсетті (S19). Ал гибридік ұсынымдық тәсіл үшін $MAE = 0.591$ нәтижесі тіркелді (S13) (Кластер 4). Бұл нәтижелер регрессиялық міндеттерде ансамбльдік модельдердің жоғары тиімділігін көрсетеді.

г) Кластерлеу. Кластерлеу міндетіне арналған жалғыз зерттеуде LSTM-Canopy алгоритмі k-means әдісімен салыстырылды (S06). Нәтижелер бойынша DS3 деректер жиынтығында LSTM-Canopy Accuracy = 84.30% мәніне жетіп, Emin көрсеткіші бойынша дәстүрлі k-means алгоритмінен жақсы нәтиже көрсетті.

Бірінші зерттеу сұрағы нәтижелері бойынша ең жоғары болжамдық дәлдік көрсеткіштері негізінен ансамбльдік машиналық оқыту әдістерінде (Random Forest, Gradient Boosting) және терең оқыту модельдерінде (CNN, MLP) байқалды. Алайда алгоритмдердің артықшылығы зерттеу міндетіне, қолданылған деректерге және бағалау көрсеткіштеріне тәуелді болды, сондықтан барлық жағдай үшін әмбебап ең үздік модель анықталған жоқ.

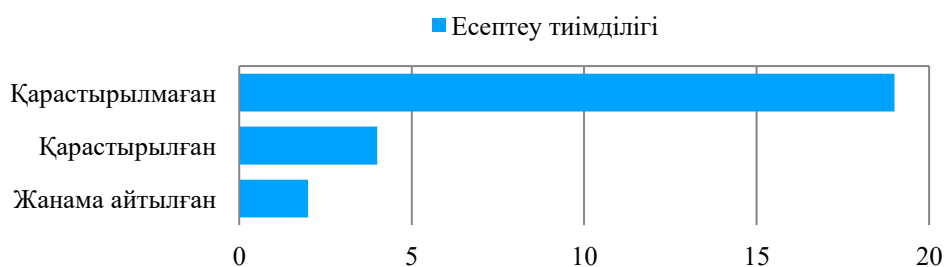
Екінші зерттеу сұрағы бойынша машиналық және терең оқыту алгоритмдерінің есептеу тиімділігі талданды. Есептеу тиімділігі туралы ақпарат енгізілген 25 зерттеудің аз бөлігінде ғана қарастырылған. Зерттеулерде бұл мәселе архитектуралық шешімдер, алгоритмдік күрделілік, гиперпараметрлерді оңтайландыру, оқыту параметрлері және болжау кідірісі тұрғысынан бағаланды. Алайда жұмыстардың көпшілігінде есептеу тиімділігін сипаттайтын сандық көрсеткіштер берілмеген.

Бірқатар зерттеулерде есептеу шығындарын азайтуға бағытталған тәсілдер ұсынылған. Мысалы, (S03) зерттеуінде нейрондық желілерді негізгі есептеу циклінен шығару арқылы жүйенің масштабталуы мен тиімділігі арттырылған. (S08) жұмысында алгоритмнің есептеу күрделілігі $O((N \log N) - (\log^2 k))$ аралығында бағаланып, TPE негізіндегі гиперпараметрлерді оңтайландыру оқыту тиімділігін жақсартатыны көрсетілген. (S11) зерттеуінде Gradient Boosting және Random Forest модельдерінің тиімділігі оңтайлы гиперпараметрлерді таңдау арқылы қамтамасыз етілетіні айтылған.

Есептеу тиімділігі бойынша нақты сандық нәтижелер шектеулі болды. Мысалы, (S14) зерттеуінде 300 белгі пайдаланылған жағдайда модельдің жауап беру уақыты 5.62 мс болғаны көрсетілген, бұл оның нақты уақыт режиміне жақын қолданбаларға жарамдылығын дәлелдейді. Ал (S24) жұмысында бір жасырын қабаттан (512 нейрон), шағын пакет өлшемінен (16) және 10 эпохтан аспайтын оқыту циклінен тұратын модель салыстырылған тәсілдер арасындағы ең жеңіл және жылдам архитектура ретінде сипатталған.

Жалпы алғанда, есептеу тиімділігі енгізілген зерттеулердің көпшілігінде жүйелі түрде қарастырылмаған. Тек 4 зерттеуде бұл мәселе тікелей талданса, 2 зерттеуде жанама түрде қарастырылған, ал қалған 19 жұмыста есептеу тиімділігі туралы ақпарат берілмеген (2-сурет). Сондықтан қазіргі әдебиеттерде алгоритмдердің болжамдық дәлдігіне көбірек көңіл бөлініп, есептеу шығындары мен ресурстық тиімділікті бағалау жеткілікті деңгейде

жүргізілмейтіні байқалады.

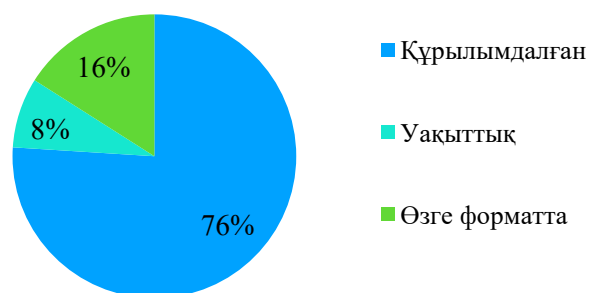


Сурет 2 – Есептеу тиімділігі мәселесін қарастыру белгісі бойынша зерттеулерді санаттау нәтижелері

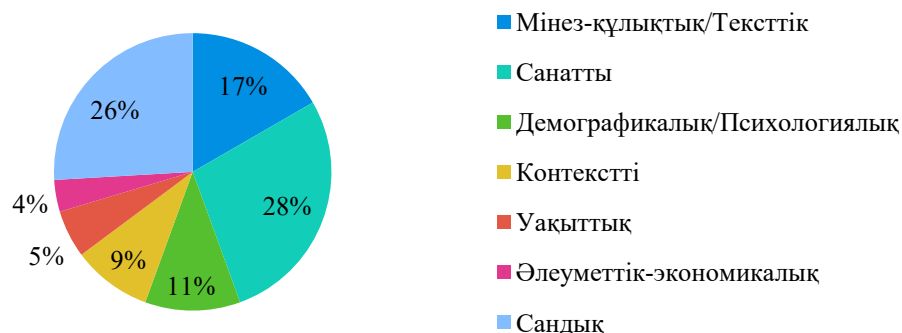
Екінші зерттеу сұрағы бойынша қорытындылай келе, есептеу тиімділігі тұрғысынан нақты көшбасшы алгоритмді анықтау мүмкін болмады, себебі зерттеулердің басым бөлігінде уақыт, жад шығыны немесе ресурстық тұтыну көрсеткіштері жүйелі түрде есептелмеген. Соған қарамастан, жеңілдетілген нейрондық желі архитектуралары, оңтайландырылған ансамбльдік әдістер және күрделілігі төмен модельдер есептеу тиімділігі жоғары тәсілдер ретінде ерекшеленді.

Үшінші зерттеу сұрағы бойынша мансаптық ұсыным модельдерінде қолданылатын деректер түрлері және олардың алгоритмдерді таңдау мен өнімділік көрсеткіштерімен байланысы талданды. Зерттеу барысында деректер форматтарының таралуы, әртүрлі деректер түрлеріне сәйкес келетін алгоритмдер және олардың өнімділігін бағалау үшін қолданылған көрсеткіштер қарастырылды.

а) Қолданылатын деректер түрлері. Талдау нәтижелері мансаптық ұсыным жүйелерінде құрылымдалған кестелік деректердің басым қолданылатынын көрсетті. Енгізілген 25 зерттеудің 19-ында негізгі деректер көзі ретінде құрылымдалған кестелік белгілер пайдаланылған (3-сурет). Деректердің семантикалық құрамы бойынша санаттық және реттік белгілер (15 зерттеу), сондай-ақ сандық белгілер (14 зерттеу) жиі кездеседі. Бірқатар жұмыстарда бірнеше деректер түрі бір мезгілде қолданылғандықтан, деректер санаттарының жиынтық саны зерттеулер санынан асып түседі (4-сурет).



Сурет 3 – ЖИ -мансаптық ұсыным жүйесі зерттеулеріндегі деректер форматтарының таралуы

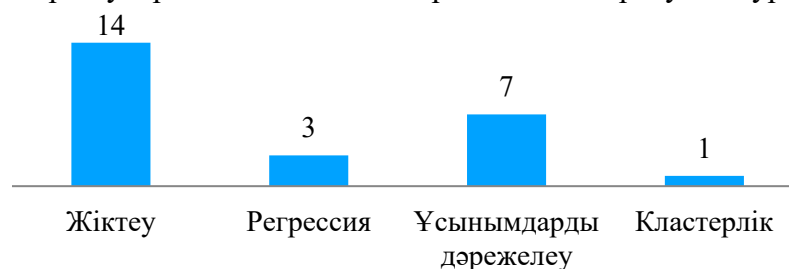


Сурет 4 – Шолудағы деректер түрлерінің пайдаланылуы (N=25).

б) Деректер түрлерінің алгоритмдерді таңдаумен байланысы. Құрылымдалған кестелік деректер пайдаланылған зерттеулерде ең жоғары нәтижелерді негізінен классикалық машиналық оқыту және ансамбльдік әдістер көрсетті. Әсіресе Random Forest [S12, S19, S22] және Gradient Boosting (S11) модельдері жиі кездеседі. Ал мәтіндік немесе аралас форматтағы деректер қолданылған жағдайда SVM және Logistic Regression (S07), CNN және LSTM (S21), CNN (S25), сондай-ақ CIRF-MLP (S15) сияқты нейрондық желі және гибридік модельдер жоғары өнімділік көрсетті. Мінез-құлықтық және реттік деректер үшін үздік нәтижелер ұсынымдық және реттік міндеттерге бейімделген модельдерде байқалды. Олардың қатарында MLP (S24), Hybrid CF + KG + time-decay (S13) және feature-based & time-aware hybrid collaborative filtering (S14) сияқты гибридік ұсынымдық тәсілдер бар. Психометриялық деректер жеке деректер көзі ретінде де, аралас құрылымдалған деректер жиынтықтарының құрамында да пайдаланылды. Бұл санаттағы зерттеулерде алгоритмдердің әртүрлілігі байқалды: KNN (S20), FINN (S10), MES (S17), сондай-ақ FCM және LSE компоненттері бар Takagi–Sugeno моделі (S18) жоғары нәтижелер көрсетті. Ал психометриялық белгілер басқа құрылымдалған деректермен біріктірілген жағдайларда XGBoost (S02) және SVM/LR (S07) сияқты дәстүрлі машиналық оқыту алгоритмдері тиімді болды.

Жалпы алғанда, нәтижелер деректер түрінің алгоритмдерді таңдауға тікелей әсер ететінін көрсетті. Құрылымдалған кестелік деректер үшін ансамбльдік модельдер басым болса, мінез-құлықтық және реттік деректер үшін гибридік ұсынымдық жүйелер, ал психометриялық деректер үшін әртүрлі машиналық оқыту және бұлдыр логикаға негізделген тәсілдер қолданылған.

в) Деректер түрлерінің өнімділік көрсеткіштерімен байланысы. Деректер түрлері мен модельдердің өнімділігі арасындағы байланысты талдау мақсатында зерттеулерде қолданылған бағалау көрсеткіштері төрт негізгі санатқа жіктелді: жіктеу, регрессия, ұсынымдарды дәрежелу және кластерлік. Мұндай жіктеу әртүрлі деректер түрлеріне сәйкес қолданылатын бағалау тәсілдерін салыстыруға мүмкіндік берді. Зерттеулердің аталған санаттар бойынша таралуы 5-суретте көрсетілген.



Сурет 5 – Кіріс деректері түрлері негізінде қолданылған негізгі бағалау көрсеткіштерінің жіктелуі.

Ескерту: Мәндер тиісті көрсеткіштер тобы пайдаланылған зерттеулер санын көрсетеді.

Құрылымдалған кестелік деректер қолданылған зерттеулерде өнімділік көбінесе жіктеу және регрессия көрсеткіштері арқылы бағаланды. Бұл санаттағы жұмыстарда Accuracy, Precision, Recall, F1-score, AUC, MSE, RMSE және R-squared көрсеткіштері кеңінен қолданылды. Мысалы, (S12) зерттеуінде Accuracy және AUC көрсеткіштері 99%-дан жоғары нәтижелерге жетсе, (S09) жұмысында регрессиялық модельдер үшін төмен қателік мәндері мен жоғары детерминация коэффициенті тіркелген.

Реттік және мінез-құлықтық деректер пайдаланылған зерттеулерде бағалау көбіне ұсынымдық жүйелерге тән көрсеткіштер арқылы жүргізілді. Атап айтқанда, MRR, Recall@K, HR және NDCG сияқты дәрежелік көрсеткіштері (S01, S24), сондай-ақ ұсынымдық міндеттер үшін MAE көрсеткіші (S13) қолданылды.

Мәтіндік және мультимодальды деректер пайдаланылған зерттеулерде өнімділік негізінен жіктеу көрсеткіштері арқылы бағаланды. Бұл жұмыстарда Accuracy, Precision, Recall, F1-score және AUC-ROC көрсеткіштері жоғары мәндер көрсетті (S07, S21, S25).

Жалпы алғанда, нәтижелер деректер түрі мен бағалау көрсеткіштері арасында белгілі бір байланыс бар екенін көрсетті: құрылымдалған кестелік деректер көбіне жіктеу және регрессия көрсеткіштерімен, ал реттік және мінез-құлықтық деректер ұсынымдарды дәрежелік көрсеткіштерімен бағаланған. Мәтіндік және мультимодальды деректер жағдайында жіктеу көрсеткіштері басым қолданылды.

Талқылау. Бірінші зерттеу сұрағы нәтижелері ең жоғары болжамдық дәлдік көрсеткіштері бақылаулы оқытуға негізделген жіктеу міндеттерінде байқалатынын көрсетті. Бұл санатта ансамбльдік әдістер мен нейрондық желі модельдері Accuracy, AUC және F1 көрсеткіштері бойынша жоғары нәтижелерге қол жеткізді. Алайда алгоритмдерді салыстыру тек бірдей міндет қойылымдары мен бірдей бағалау көрсеткіштері шеңберінде ғана орынды. Себебі әртүрлі бағалау көрсеткіштері модель өнімділігінің әртүрлі қырларын сипаттайды. Мысалы, AUC жіктеу сапасын бағаласа, NDCG@K ұсынымдарды дәрежелік сапасын көрсетеді. Сондықтан әртүрлі міндеттерге арналған зерттеулер арасындағы тікелей салыстыру әдіснамалық тұрғыдан дұрыс емес.

Ұсынымдық міндеттерде бағалау көрсеткіштерінің (Precision@K, HR, NDCG және т.б.) және K параметрінің әртүрлілігі ерекше байқалады. Бұл жағдай мақалааралық сандық салыстыру жүргізуді қиындатып, нәтижелерді негізінен сипаттамалық синтез деңгейінде қарастыруға мәжбүр етеді. Жүргізілген талдау негізінде екі негізгі заңдылық анықталды. Біріншіден, ансамбльдік және нейрондық желі модельдері жіктеу міндеттерінде тұрақты түрде жоғары дәлдік көрсетеді. Екіншіден, гибридік және ұсынымдық жүйелерде қолданылатын бағалау көрсеткіштерінің әркелкілігі бірыңғай дәлелдік қор қалыптастыруды қиындатады. Осыған байланысты болашақ зерттеулерде бағалау хаттамаларын стандарттау маңызды болып табылады. Атап айтқанда, жіктеу міндеттері үшін бірыңғай көрсеткіштер жиынтығын, Top-N ұсынымдары үшін бірдей K мәніндегі ортақ дәрежелік көрсеткіштерін, ал регрессия үшін RMSE және MAE көрсеткіштерін қатар ұсыну ұсынылады. Бұл зерттеулер арасындағы нәтижелердің салыстырмалылығын арттырып, мансаптық ұсыным жүйелерінің тиімділігі туралы қорытындылардың сенімділігін күшейтеді.

Кластерлер арасындағы айырмашылықтарды статистикалық талдау. Жіктеу дәлдігі туралы сандық деректер берілген зерттеулер негізінде алгоритмдік кластерлердің сипаттамалық статистикасы есептелді. Орташа мәндер 1-кластер ($M=0.950$), 2-кластер ($M=0.947$) және 3-кластер ($M=0.875$) арасында белгілі бір айырмашылықтардың бар екенін көрсетті. Алайда шағын іріктеме көлеміне байланысты Краскел–Уоллис критерийі бойынша айырмашылықтар статистикалық мәнділік деңгейіне жеткен жоқ ($N=4.00$, $p=0.135$). Әсер мөлшерін бағалау нәтижелері 1-кластер мен 3-кластер, сондай-ақ 2-кластер мен 3-кластер арасында практикалық тұрғыдан елеулі айырмашылықтардың болуы мүмкін екенін көрсетті. Дегенмен, зерттеулер санының шектеулілігі және тәжірибелік жағдайлардың жоғары гетерогенділігі бұл нәтижелерді алдын ала сипаттағы қорытынды

ретінде қарастыруды талап етеді. Сондықтан алынған нәтижелерді жалпылау кезінде сақтық қажет.

Екінші зерттеу сұрағы бойынша нәтижелер есептеу тиімділігі ЖИ-мансаптық ұсыным жүйесі зерттеулерінде жүйелі бағаланатын өлшемшарт ретінде қарастырылмайтынын көрсетті. Күрделі модельдерге деген қызығушылықтың артып келе жатқанына қарамастан, тек аз ғана жұмыстар есептеу шығындарының нақты немесе сандық өлшенетін көрсеткіштерін келтіреді, мысалы кідіріс [7], күрделілік немесе оқыту параметрлері. Бұл орайда келесі заңдылық байқалды. Тоқталатын болсақ, есептеу тиімділігі жоғары шешімдер, әдетте, архитектуралық қарапайымдылығымен ерекшеленеді. Жеңіл нейрондық архитектуралар, классикалық машиналық оқыту алгоритмдері және аз параметрлі модельдер оқыту мен болжау жылдамдығы тұрғысынан жақсы нәтиже көрсетеді. Ал, ансамбльдер мен әсіресе LLM сияқты күрделі тәсілдер айтарлықтай есептеу ресурстарын қажет етеді және жиі дәлдік пен іс жүзінде қолданудың ымырасын болжайды. Көп жағдайда авторлар сапалық тұжырымдармен шектеледі [8] немесе тиімділікті тек жанама түрде қарастырады [9]. Бұл берілген өлшемшарт бойынша алгоритмдердің үстемдігі туралы жалпылалған қорытындыларды едәуір қиындатады. Зерттеушілік тұрғыдан бұл жерде айқын олқылық байқалып отыр. Есептеу тиімділігі тәуелсіз бағалау өлшемшарты ретінде сирек қолданылады. Бұл дәлдік, түсіндіру мүмкіндігі мен есептеу шығындары арасындағы баланс іздеуге бағытталған болашақ жұмыстарға перспективалар ашады. Сонымен қатар, осы шолу аясында алгоритмдерді есептеу тиімділігі бойынша статистикалық салыстыру жүргізу мүмкін болмады. Қамтылған 25 зерттеудің тек 6-сы ғана осы қырынан қарастырады, олардың ішінде тек 2 зерттеу сандық көрсеткіштерді (жауап беру уақыты, есептеу күрделілігі) ұсынады. Қалған жұмыстар сапалық сипаттамалармен ғана шектелген. Салыстыруға болатын сандық деректердің болмауы қандай да бір статистикалық тестті қолдану мүмкіндігін жоққа шығарады.

Деректер түрлерін талдаудағы зерттеулерде құрылымдалған кестелік деректер айқын басымдық танытатыны анықталды. Мәтіндік, мінез-құлықтық, реттік және мультимодальды деректер көздері [10-11] айтарлықтай сирек пайдаланылады. Белгілер арасында санаттық және сандық белгілер ең кең тараған болғаны анықталды. Деректер түрі мен ең тиімді деп танылған алгоритмдер класы арасында тұрақты байланыс байқалады. Кестелік деректер үшін классикалық және ансамбльдік машиналық оқыту әдістері, мәтіндік деректер үшін құрылымдалмаған ақпаратты өңдеу алгоритмдері, мінез-құлықтық және реттік деректер үшін ұсынымдық және уақытша міндет қойылымдарына бағытталған модельдер жиі таңдалады екен. Психометриялық деректер ең жоғары алгоритмдік вариативтілігімен ерекшеленеді және ешбір басымды тәсілге жуымайды.

Анықталған заңдылықтар алгоритм таңдауы бірінші кезекте кіріс деректерінің сипаттамаларымен анықталатынын көрсетеді. Тіркелген белгі векторлары бар сценарийлерде кестелік құрылымды жақсы өңдей алатын алгоритмдерге артықшылық беріледі. Мәтіндік компоненттер қосылған кезде зерттеушілер құрылымдалмаған мазмұннан белгілерді шығара алатын модельдерге жүгінеді. Деректер динамикасы немесе өзара әрекеттесулердің реттілігін бейнелейтін жерлерде оқиғалардың ретін және уақытша тәуелділігін ескеретін тәсілдер қолданылады. Психометриялық деректер үшін басымды алгоритмнің болмауы психологиялық конструктілерді ұсыну тәсілдерінің алуандылығымен және мансаптық ұсыным жүйелерінде оларды модельдеудің қалыптасқан тәжірибесінің жоқтығымен түсіндіріледі.

Үшінші зерттеу сұрағының мақсаты сандық көрсеткіштерді салыстыру емес, деректер түрлерінің таралуын сипаттау және олардың алгоритмдерді таңдаумен байланысын анықтау болып табылады. Сол себепті статистикалық тест қолданылған жоқ. Қарастырылған зерттеулерде құрылымдалған кестелік деректер негізінен жіктеу көрсеткіші арқылы бағаланатындығына көз жеткізілді. Регрессиялық көрсеткіштер айтарлықтай сирек қолданылады және тек жекелеген жұмыстарда кездеседі [12-13]. MRR, HR, NDCG және

Precision@k сияқты ұсынымдық және ранг көрсеткіштері негізінен мінез-құлықтық және реттік деректерге ғана тән [14]. Барлық тиісті зерттеулерде мәтіндік және мультимодальды деректер Accuracy, AUC, Precision, Recall және F1 қоса алғанда тек жіктеу көрсеткіштері арқылы бағаланады.

Жүйелі шолудың шектеулері. Маңызды шектеудің бірі - толық мәтіндік сүзгілеу кезеңіндегі 123 жарияланымның 86-ы (69,9%) ақылы болу салдарынан қолжетімсіз болуы. Бұл іріктеу қатесінің тәуекелін арттырды. Демек, алынған нәтижелерді абайлап талдаған жөн. Қолжетімсіз зерттеулер өзге, соның ішінде қайшылықты деректерді қамтуы мүмкін. Енгізілген жұмыстардың жоғары гетерогенділігі де өз шектеулерін туғызды. Деректер жиынтықтарындағы, бағалау көрсеткіштеріндегі және міндет қойылымдарындағы айырмашылықтар ресми мета-талдау жүргізуге мүмкіндік бермеді. Нәтижесінде нәтижелерді синтездеу сапалық сипаттамалық талдаумен шектелді.

Берілген жұмыс әдебиеттерге жүйелі шолу болып табылады және авторлар тарапынан алынған түп нұсқалық тәжірибелік деректерді қамтымайды. Бұл — PRISMA 2020 нұсқаулығына сәйкес жүйелі шолу жанрының талаптарына сай қабылданған саналы әдіснамалық шешім. Зерттеудің осы түрінің негізгі мақсаты жаңа тәжірибелік нәтижелер алу емес, қолда бар ғылыми дәлелдерді жүйелеу, синтездеу және сыни тұрғыдан бағалау болып табылады.

Жүргізілген шолу бар әдебиеттегі бірнеше маңызды олқылықтарды анықтауға мүмкіндік береді. Біріншіден, реттік және мультимодальды деректер шектеулі түрде ұсынылған. Бұл динамикалық мансаптық траекторияларға бағытталған жүйелерге арналған қорытындылардың жалпыламалылығын төмендетеді. Екіншіден, психометриялық және әлеуметтік-экономикалық деректер ішінара пайдаланылады және олар үшін алгоритмдер таңдауы мен бағалау хаттамалары бойынша ортақ ұстаным жоқ. Үшіншіден, қолданылатын көрсеткіштерінің гетерогенділігі байқалады. Бұл процесс зерттеулер арасындағы өнімділікті салыстыруды қиындатады және жинақталған талдау мүмкіндігін шектейді.

Зерттеулерге арналған ұсынымдар. Болашақ зерттеулерде қолданылатын деректер көздерін кеңейту қажет. Әсіресе реттік, мәтіндік және мультимодальды деректерге, сондай-ақ психометриялық және әлеуметтік-экономикалық белгілерді жүйелі енгізуге көбірек назар аударған жөн. Сонымен қатар бағалау көрсеткіштерін міндет түрлеріне сәйкес стандарттау зерттеулер арасындағы нәтижелердің салыстырмалылығын арттыруға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер мансаптық ұсыным жүйелерінде алгоритм таңдауы ең алдымен қолжетімді деректердің сипатына негізделуі тиіс екенін көрсетті. Деректер ерекшеліктерін ескермей әмбебап модельдерді қолдану жүйенің тиімділігі мен талдау мүмкіндіктерін төмендетуі мүмкін.

Алгоритмді таңдау бойынша практикалық ұсынымдар. Қамтылған зерттеулердің нәтижелерін синтездеу негізінде мансаптық ұсыным жүйелерін әзірлеушілер үшін келесі ұсынымдар тұжырымдалды:

- Құрылымдалған кестелік деректер (академиялық үлгерім, тест нәтижелері, әлеуметтік-демографиялық сипаттамалар) үшін Random Forest және Gradient Boosting сияқты ансамбльдік әдістерді қолдану ұсынылады, себебі олар жоғары дәлдік пен жақсы түсіндіру мүмкіндігін қамтамасыз етеді.

- Мәтіндік және мультимодальды деректерді өңдеу үшін CNN және LSTM негізіндегі модельдер тиімді, алайда олардың есептеу ресурстарына қойылатын талаптары жоғары.

- Мінез-құлықтық және реттік деректер жағдайында уақыттық тәуелділіктерді ескеретін гибридік ұсынымдық тәсілдер қолайлы болып табылады.

- Психометриялық деректер үшін әмбебап тиімді алгоритм анықталмағандықтан, бірнеше модельді нақты деректер жиынтығында салыстырмалы түрде сынақтан өткізу ұсынылады.

- Бағалау көрсеткіштері міндет түріне сәйкес таңдалуы тиіс: жіктеу үшін Assurasy және F1-score, регрессия үшін RMSE немесе MAE, дәрежелеу міндеттері үшін NDCG және Precision@K.
- Есептеу тиімділігін стандарттау мақсатында болашақ зерттеулерде модельді оқыту уақыты, болжау уақыты, параметрлер саны және қолданылған аппараттық орта туралы ақпаратты міндетті түрде көрсету ұсынылады.
- Алгоритмдердің асимптотикалық күрделілігін (O-нотация) көрсету нәтижелердің қайта жаңғыртылуын жақсартып, модельдерді практикалық қолдану тұрғысынан салыстыруға мүмкіндік береді.

Қорытынды.

Зерттеу барысында жасанды интеллект негізіндегі мансаптық ұсыным жүйелеріне арналған әдебиеттерге жүйелі шолу жүргізілді. Нәтижелер алгоритмдердің өнімділігі міндет түріне, бағалау көрсеткіштеріне және пайдаланылатын деректердің сипатына тәуелді екенін көрсетті.

Бірінші зерттеу сұрағы бойынша ең жоғары дәлдік көрсеткіштері негізінен жіктеу міндеттерінде ансамбльдік және нейрондық желі модельдері арқылы алынатыны анықталды. Екінші зерттеу сұрағы есептеу тиімділігінің қазіргі зерттеулерде жеткілікті деңгейде бағаланбайтынын көрсетті. Үшінші зерттеу сұрағы нәтижелері алгоритмдерді таңдау мен олардың өнімділігі деректер түрлерімен тығыз байланысты екенін дәлелдеді.

Жалпы алғанда, болашақ зерттеулер үшін бағалау хаттамаларын стандарттау, есептеу тиімділігін жүйелі түрде есепке алу және мультимодальды деректерді кеңінен пайдалану қажеттілігі анықталды. Жұмыстың ғылыми жаңалығы алгоритмдердің бес кластерден тұратын жіктелуін ұсынуымен, деректер түрлері мен алгоритмдер арасындағы байланысты анықтауымен және осы саладағы негізгі зерттеу олқылықтарын жүйелеуімен сипатталады.

Әдебиеттер тізімі

1. Trujillo, F., Pozo, M., & Suntaxi, G. (2025). Artificial intelligence in education: A systematic literature review of machine learning approaches in student career prediction. *Journal of Technology and Science Education*, 15(1), 162-185. <https://doi.org/10.3926/jotse.3124>
2. Zayed, Y., Salman, Y., & Hasasneh, A. (2022). A Recommendation System for Selecting the Appropriate Undergraduate Program at Higher Education Institutions Using Graduate Student Data. *Applied Sciences*, 12(24), 12525. <https://doi.org/10.3390/app122412525>
3. Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ. Computer science*, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
4. Gunawardana, A., & Shani, G. (2009). A Survey of Accuracy Evaluation Metrics of Recommendation Tasks. *Journal of Machine Learning Research*, 10(100), 2935–2962. <https://jmlr.csail.mit.edu/papers/volume10/gunawardana09a/gunawardana09a.pdf>
5. Matthew J. Page, Joanne E. McKenzie, Patrick M. Bossuyt, et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
6. Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering (EBSE Technical Report EBSE-2007-01). Keele University and Durham University Joint Report.
7. Mahboob K, Asif R, Haider N. Career planning matters: Intelligence-based career path predictions using data mining models - A longitudinal study. *MEHRAN UNIVERSITY RESEARCH JOURNAL OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY*. 2024;43(4):192-213. doi:10.22581/muet1982.3343.

8. Gülten, H., & Baraçlı, H. (2024). A Machine Learning-Based Forecast Model for Career Planning in Human Resource Management: A Case Study of the Turkish Post Corporation. *Applied Sciences*, 14(15), 6679. <https://doi.org/10.3390/app14156679>
9. Fatima N, Gul S, Ahmed J, Khand Z, Mujtaba G. A rule-based machine learning model for career selection through MBTI personality. *Mehran university research journal of engineering and technology*. 2022;41(2):185-196. doi:10.22581/muet1982.2202.18.
10. Cheng Y. Development of a Career Planning Assistance Platform for College Students Combining Fuzzy Logic and Deep Learning. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*. 2025;29(3):445-455. doi:10.20965/jaciii.2025.p0445.
11. José-García, A., Sneyd, A., Melro, A., Ollagnier, A., Tarling, G., Zhang, H., Stevenson, M., Everson, R., & Arthur, R. (2023). C3-IoC: A career guidance system for assessing student skills using machine learning and network visualisation. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 33, 1094–1121. <https://doi.org/10.1007/s40593-022-00317-y>
12. Talib, A., Housni, M., & Radid, M. (2023). Utilizing M-technologies for AI-driven career guidance in Morocco: An innovative mobile approach. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 17, 173–188. <https://doi.org/10.3991/ijim.v17i24.44263>
13. Zylowski, T., Sautchuk-Patricio, N., Hettmann, W., Anderer, K., Fischer, K., Wölfel, M., & Henning, P. (2024). User study on the trustworthiness, usability and explainability of intent-based and large language model-based career planning conversational agents. In *Proceedings of the 16th International Conference on Education Technology and Computers* (pp. 46–53). ACM. <https://doi.org/10.1145/3702163.3702409>
14. Alonso, R., Dessì, D., Meloni, A., Murgia, M., Recupero, D. R., & Scarpi, G. (2024). A seamless ChatGPT knowledge plug-in for the labour market. *IEEE Access*, 12, 155821–155837. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3485111>

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СИСТЕМ КАРЬЕРНЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Аннотация. В условиях стремительных изменений на рынке труда и роста доступности образовательных данных разработка систем карьерного консультирования на основе искусственного интеллекта (ИИ) становится одним из актуальных направлений исследований. Однако влияние типов данных и особенностей выбора алгоритмов на прогностическую точность и вычислительную эффективность моделей до сих пор недостаточно систематизировано. Целью данного исследования является систематизация современных исследований в области ИИ-ориентированных систем карьерных рекомендаций и выявление взаимосвязей между типами данных, алгоритмами и показателями оценки. Исследование основано на систематическом обзоре, проведённом в соответствии с методологией PRISMA 2020. Анализ выполнен в рамках взаимосвязи «тип данных – алгоритм – показатель оценки». Результаты показали, что среди рассмотренных исследований преобладают задачи классификации (56 %), а наиболее часто используются структурированные табличные данные (76 %). Наивысшие показатели прогностической точности были достигнуты преимущественно ансамблевыми методами и моделями нейронных сетей. Вместе с тем выявлено, что вычислительная эффективность в большинстве исследований не оценивается систематически: в 76 % работ соответствующие показатели отсутствуют. Кроме того, установлено, что выбор алгоритмов в значительной степени зависит от используемых типов данных. Полученные результаты позволяют систематизировать алгоритмические подходы в системах карьерных рекомендаций и указывают на необходимость стандартизации протоколов оценки, систематического учёта вычислительной эффективности и более широкого использования мультимодальных данных в будущих исследованиях. Кроме того, разработка ИИ-ориентированных систем

рекомендаций, адаптированных к особенностям национального рынка труда и образовательной среды, представляет собой актуальное направление исследований.

Ключевые слова: искусственный интеллект, карьерные рекомендации, рекомендательные системы, типы данных, алгоритмы машинного обучения, прогностическая точность, вычислительная эффективность.

PERFORMANCE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED CAREER RECOMMENDATION SYSTEMS: A SYSTEMATIC REVIEW

Abstract. *In the context of rapid changes in the labor market and the increasing availability of educational data, the development of artificial intelligence (AI)-based career recommendation systems has become an important research direction. However, the influence of data types and algorithm selection on the predictive accuracy and computational efficiency of such systems remains insufficiently systematized. The aim of this study is to systematize current research on AI-driven career recommendation systems and to identify relationships among data types, algorithms, and evaluation metrics. The study is based on a systematic literature review conducted in accordance with the PRISMA 2020 guidelines. The analysis was performed within the “data type–algorithm–evaluation metric” framework. The results show that classification tasks dominate the reviewed studies (56%), while structured tabular data represent the most frequently used data type (76%). The highest predictive performance was achieved primarily by ensemble machine learning methods and neural network models. At the same time, a significant gap was identified regarding the assessment of computational efficiency, as 76% of the analyzed studies did not report relevant computational performance measures. Furthermore, the findings indicate that algorithm selection is strongly associated with the characteristics of the underlying data. The study contributes to the systematization of algorithmic approaches used in career recommendation systems and highlights the need for standardized evaluation protocols, systematic reporting of computational efficiency, and broader adoption of multimodal data in future research. In addition, the development of AI-driven recommendation systems tailored to the specific characteristics of national labor markets and educational environments represents an important direction for future studies.*

Keywords: *artificial intelligence, career recommendations, recommender systems, data types, machine learning algorithms, predictive accuracy, computational efficiency.*

Авторлар туралы мәлімет

Абраймова Динара Сержановна	Техника ғылымдарының магистрі, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің, «Бизнес және цифрлық технологиялар» институтының докторанты, Астана қ., Қазақстан, E-mail: dabraymova@gmail.com
Нургалиева Сымбат Алтыбаевна	PhD, Astana IT university, Бағдарламалық инженерия кафедрасының ассистент профессоры, Астана қ., Қазақстан E-mail: symbat.nurgaliyeva@astanait.edu.kz
Башеева Жулдыз Орынбасаровна	PhD, Astana IT university, Бағдарламалық инженерия департаментінің ассистент профессоры, Астана қ., Қазақстан E-mail: zhuldyz.basheeva@astanait.edu.kz
Туткышбаева Шырын Сарыбайевна	PhD, Astana IT university, Бағдарламалық инженерия департаментінің ассистент профессоры, Астана қ., Қазақстан E-mail: Sh.Tutkyshbayeva@astanait.edu.kz
Сыздықпасва Айгуль Рамазановна	Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, жасанды интеллект және ақпараттық технологиялар кафедрасының қауымдастырылған профессоры, т.ғ.к., Өскемен қ., Қазақстан, E-mail: aigul uk@list.ru

Сведения об авторах

Абраймова Динара Сержановна	Магистр технических наук, докторант института «Бизнеса и цифровых технологий» Казахского агротехнического исследовательского университета имени С.Сейфуллина, г. Астана, Казахстан, E-mail: dabraymova@gmail.com
Нургалиева Сымбат Алтыбаевна	Ассистент профессор кафедры программной инженерии, PhD, Астана IT университет, Астана, Казахстан, E-mail: symbat.nurgaliyeva@astanait.edu.kz

Башеева Жулдыз Орынбасаровна	Ассистент профессор департамента программной инженерии, PhD, Астана IT университет, Астана, Казахстан E-mail: zhuldyz.basheeva@astanait.edu.kz
Туткышбаева Шырын Сарыбайевна	Ассистент профессор департамента программной инженерии, PhD, Астана IT университет, Астана, Казахстан E-mail: Sh.Tutkyshbayeva@astanait.edu.kz
Сыздыкпаева Айгуль Рамазановна	Ассоциированный профессор кафедры искусственного интеллекта и информационных технологий, PhD, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан, E-mail: aigul_uk@list.ru

Information about authors

Abraimova Dinara Serzhanovna	Master of Technical Sciences, Doctoral student at the Institute of Business and Digital Technologies of the Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, Kazakhstan, E-mail: dabraymova@gmail.com
Nurgaliyeva Symbat Altybaevna	Assistant professor of department of software engineering, PhD, Astana IT University, Astana, Kazakhstan E-mail: symbat.nurgaliyeva@astanait.edu.kz
Basheeva Zhuldyz Orynassarovna	Assistant professor of department of software engineering, PhD, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, E-mail: zhuldyz.basheeva@astanait.edu.kz
Shyryn Tutkyshbayeva	Assistant professor of department of software engineering, PhD, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, E-mail: Sh.Tutkyshbayeva@astanait.edu.kz
Syzdykpayeva Aigul Ramazanovna	Associate Professor of the Department of Department of Artificial Intelligence and Information Technology, c.t.sc., Sarsen Amanzholov East Kazakhstan university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan E-mail: aigul_uk@list.ru

МАЗМУНЫ/СОДЕРЖАНИЕ/ CONTENTS

ӘУЕ КӨЛІГІ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВОЗДУШНЫЙ ТРАНСПОРТ И ТЕХНОЛОГИИ AIR TRANSPORT AND TECHNOLOGY	
Isgandarov I., Hajizada M. ADAPTIVE TRANSITION TRAJECTORY OPTIMIZATION FOR VERTICAL TAKE-OFF AND LANDING UNMANNED AERIAL VEHICLES	6
Муратхан Б., Кошекков К.Т., Керибаева Т.Б. КИБЕР-МОДЕЛЬ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ АЭРОМОБИЛЬНОСТИ	16
Саурбекова А.Б., Ғұсман Ә.С. ТӨМЕН ЖЕР ОРБИТАЛАРЫНДА ШАҒЫН ҒАРЫШ АППАРАТТАРЫН БАСҚАРУДЫҢ ПАЙДАЛЫ ЖҮКТЕМЕСІН ЖӘНЕ БОРТТЫҚ КЕШЕНІН ЭНЕРГИЯ ТҰТЫНУДЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУДЫҢ ЗАМАНАУИ ТӘСІЛДЕРІ	33
Koshekov A., Kuanov Y. DIGITAL TRANSFORMATION OF PROFESSIONAL AVIATION MULTILINGUAL COMMUNICATIONS: A CORPUS-BASED STUDY	45
ЛОГИСТИКА, ТАСЫМАЛДАУДЫ ҰЙЫМДАСТЫРУ, КӨЛІКТЕГІ ҚАУІПСІЗДІК ЛОГИСТИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, БЕЗОПАСНОСТЬ НА ТРАНСПОРТЕ LOGISTICS, TRANSPORTATION ORGANIZATION, TRANSPORT SECURITY	
Аймагамбетова Б.А., Киселёва О.Г., Капезова Н.Г., Имашева Г.М., Токмурзина Н.А. ҚОЗҒАЛЫС ҚАУІПСІЗДІГІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ЖҮК АҒЫНДАРЫНЫҢ ӨСУІ КЕЗІНДЕ ТЕМІРЖОЛ ТАСЫМАЛДАУШЫСЫНЫҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУ	56
Калиева Г.К., Алтаева Г.О., Конакбай З.Е., Альчимбаева А.С. ЭКОНОМИКА «ЗЕЛЁНОЙ» ЛОГИСТИКИ В ОРГАНИЗАЦИИ АВИАПЕРЕВОЗОК	72
КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР, АСПАП ЖАСАУ ЖӘНЕ АВТОМАТТАНДЫРУ КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ, ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ COMPUTER SCIENCE, INSTRUMENTATION AND AUTOMATION	
Аишев А.А., Зикирьяев Н.Б., Досжанов Е.О., Нысанбаева Г.Р. МЕТОДЫ ПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ	87
Makatov Ye.K., Bishwajeet Pandey, Ismukanova A.N., Glock E.S., Esmagambetova G.K. RISK RANKING OF AUTHENTICATION EVENTS BASED ON TEMPORAL AND BEHAVIORAL CONTEXT	105
Егенова А.М., Куракбаева С.Д., Калбаева А.Т., Амандиков М.А., Жуматаев Н.С. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ	121
Уалиев Ж. Р., Михайлов П. Г., Ақжолова А. И., Кабдолдина А. О., Бактыбаев М. К. ЭКСТРЕМАЛДЫ ЖАҒДАЙЛАРДА ЖҰМЫС ІСТЕУГЕ АРНАЛҒАН ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШ СЕНСОРЛАРДЫҢ ЭЛЕКТРОФИЗИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ	133
Sairanbekova A., Bekmanova G., Franzoni V., Tuleshov Y. A HYBRID DISCOURSE-AWARE FRAMEWORK FOR MULTILINGUAL POLITICAL DISCOURSE	148
Абитаев Ф.К., Азаматов Б.Н., Корнев В.А., Алибеккызы К., Жанбосинов Р.Е. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЦИФРОВОЙ ЗРЕЛОСТИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ АГРОИНЖИНИРИНГА	164

Кайбасова, Д.Ж., Сұлтан А.Ш. БЕЙНЕЛЕРДЕГІ ШУЛАРДЫ БАСУ ӘДІСТЕРІ: ҚАЛДЫҚТАРДЫ СҰРЫПТАУДЫҢ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ НЫСАНДАРДЫ ТАҢУ ДӘЛДІГІН АРТТЫРУ	180
Жәрдемқызы С., Бактыбаев М.К., Алимбай Ш.А., Бердибаева Г.К. МОБИЛЬДІ РОБОТТАНДЫРЫЛҒАН ПЛАТФОРМАНЫҢ ҚАУІПСІЗ НАВИГАЦИЯСЫН КӨПСЕНСОРЛЫ АҚПАРАТ НЕГІЗІНДЕ ЖЕТІЛДІРУ	197
Абраймова Д.С., Нургалиева С.А., Башеева Ж.О., Туткышбаева Ш.С., Сыздықпаева А.Р. ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕГІ МАНСАПТЫҚ ҰСЫНЫМ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ӨНІМДІЛІГІ: ЖҮЙЕЛІ ШОЛУ	211

CONTENTS

<i>AIR TRANSPORT AND TECHNOLOGY</i>	
Isgandarov I., Hajizada M. ADAPTIVE TRANSITION TRAJECTORY OPTIMIZATION FOR VERTICAL TAKE-OFF AND LANDING UNMANNED AERIAL VEHICLES	6
Muratkhon B., Koshekov K., Keribayeva T. CYBER-MODEL OF RENEWABLE ENERGY FOR TERRITORIAL AIR MOBILITY	16
Saurbekova A., Gusman A. MODERN APPROACHES TO OPTIMIZING THE PAYLOAD AND ENERGY CONSUMPTION OF THE ONBOARD COMPLEX FOR CONTROLLING SMALL SPACECRAFT IN LOW EARTH ORBITS	33
Koshekov A., Kuanov Y. DIGITAL TRANSFORMATION OF PROFESSIONAL AVIATION MULTILINGUAL COMMUNICATIONS: A CORPUS-BASED STUDY	45
<i>LOGISTICS, TRANSPORTATION ORGANIZATION, TRANSPORT SECURITY</i>	
Aimagambetova B., Kisselyova O., Kapezova N., Imasheva G., Tokmurzina N. ASSESSMENT OF THE STABILITY OF A RAILWAY CARRIER WITH AN INCREASE IN FREIGHT FLOWS, TAKING INTO ACCOUNT TRAFFIC SAFETY	56
Kaliyeva G., Altayeva G., Konakbai Z., Alchimbayeva A. THE ECONOMICS OF «GREEN» LOGISTICS IN THE ORGANIZATION OF AIR TRANSPORTATION	72
<i>COMPUTER SCIENCE, INSTRUMENTATION AND AUTOMATION</i>	
Aishev A., Zikiryayev N., Doszhanov Ye., Nyssanbayeva G. METHODS FOR DIRECTION FINDING OF ACTIVE NOISE JAMMING SOURCES	87
Makatov Ye.K., Bishwajeet Pandey, Ismukanova A.N., Glock E.S., Esmagambetova G.K. RISK RANKING OF AUTHENTICATION EVENTS BASED ON TEMPORAL AND BEHAVIORAL CONTEXT	105
Yegenova A., Kurakbayeva S., Kalbayeva A., Amandikov M., Zhumataev N. DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE FOR ASSESSING AND VISUALIZING CORROSION RESISTANCE PARAMETERS OF PROTECTIVE COATINGS	121
Ualiyev Zh. R., Mikhailov P. G., Akzholova A. I., Kabdoldina A. O., Baktybayev M. K. INVESTIGATION OF THE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR SENSORS DESIGNED TO OPERATE IN EXTREME CONDITIONS	133
Sairanbekova A., Bekmanova G., Franzoni V., Tuleshov Y. A HYBRID DISCOURSE-AWARE FRAMEWORK FOR MULTILINGUAL POLITICAL DISCOURSE	148
Abitaev F., Azamatov B., Kornev V., Alibekkyzy K., Zhanbosinov R. DEVELOPMENT OF A METHOD FOR QUALITATIVE ASSESSMENT OF THE DIGITAL MATURITY OF AGROENGINEERING BUSINESS PROCESSES	164
Kaibasova D., Sultan A. IMAGE DENOISING METHODS FOR IMPROVING OBJECT RECOGNITION ACCURACY IN AUTOMATED WASTE SORTING SYSTEMS	180
Zhardemkyzy S., Baktybayev M., Alimbayev Sh., Berdibayeva G. IMPROVEMENT OF SAFE NAVIGATION FOR A MOBILE ROBOTIC PLATFORM BASED ON MULTI-SENSOR INFORMATION	197

Abraimova D., Nurgaliyeva S., Basheyeva Zh., Tutkyshbayeva Sh., Syzdykpayeva A.
PERFORMANCE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED CAREER
RECOMMENDATION SYSTEMS: A SYSTEMATIC REVIEW

211

Азаматтық авиация академиясының Жаршысы

Ғылыми журнал

2015 жылдан бастап шыға бастады

Қазақстан Республикасы Мәдениет және ақпарат министрлігінде тіркеліп, 2025 жылдың 31 қаңтарында мерзімді баспасөз басылымын, ақпараттық агенттікті және желілік басылымды қайта есепке қою туралы Куәлігі берілді (№ KZ89VPY00111238)

Вестник Академии гражданской авиации

Научный журнал

Издается с 2015 г.

Зарегистрирован Министерством культуры и информации Республики Казахстан
Свидетельство № KZ89VPY00111238 от 31 января 2025 г.

Bulletin of Civil aviation Academy

Scientific journal

Published since 2015

It is registered by the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan.
Certificate no. KZ89VPY00111238 dated January 31, 2025

Жауапты редактор: А. Т. Макеева

Ответственный редактор: А.Т. Макеева

Responsible editor: A.T. Makeeva

Басылымға 30.09.2026 ж. қол қойылды.

Формат 205*290. Өлшемі - баспа табақшасы. Таралымы 50 дана.

Издание подписано 30.09.2026 г.

Формат 205*290. Размер –печатная пластина. Тираж 50 экз.

The publication was signed on, September 30, 2026.

The format is 205*290. The size is a printed plate. Edition of 50 copies

Азаматтық авиация академиясы. 050039, Алматы қаласы, Закарпатская көшесі, 44

Академия гражданской авиации. 050039, г. Алматы, ул. Закарпатская, 44

Academy of Civil Aviation. 44 Zakarpatskaya St., 050039, Almaty