

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

№4(39) 2025

АЛМАТЫ – 2025

«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

"AAA 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

Сейдахметов Б.К., э.ғ.к., асс.профессор **(h-индекс:2)**

Бас редактордың орынбасары

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

Редакциялық алқа:

1. А.В.Стрельцов, доктор (PhD), Эмбри-Риддл Аэроавтика 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:1);**
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:4).**

Жауапты редактор: А.Макеева

Главный редактор

Б.К.Сейдахметов, к.э.н., асс. профессор (**h-индекс:2**)

Зам. главного редактора

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

Редакционная коллегия:

1. А.В. Стрельцов, доктор (PhD), профессор кафедры естественных наук университета авионавтики 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:1**);
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:4**).

Ответственный редактор: А. Макеева

Editor-in – chief

Seydakhmetov B.K., Candidate of Economics, Associate Professor (**h-index:2**)

Deputy Chief Editor

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:1**);
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:4**).

Responsible editor: A. Makeeva



UDC 621.396.963.84: 004.93'1
IRSTI 47.49.29, 50.05.03
https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_1

A. Hasanov¹, I. Isgandarov¹, T. Aliyev^{1*}
¹National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan

*E-mail: teymour.aliyev@gmail.com

ANALYSIS AND MODELING OF ADAPTIVE FILTERS TO IMPROVE THE INTERFERENCE IMMUNITY OF SECONDARY RADAR SIGNALS

Abstract. *This paper explores modern techniques to process and enhance the reliability of radar signals amid strong noise and interference typical for the secondary surveillance radar (SSR) band at 1030/1090 MHz. Air-traffic radar systems play a critical role in ensuring safe and efficient airspace management, however, their performance degrades under strong noise and interference typical of the 1030/1090 MHz band. A comprehensive analysis of filtering and adaptive signal processing algorithms was conducted to improve the signal-to-noise ratio, stabilize target response parameters, and lower false detection rates. For objective comparison, both traditional and advanced digital filtering methods were evaluated. Special focus was placed on comparing the Median, Butterworth, and recursive Kalman filters, implemented and tested in MATLAB with synthetic data and simulated radar scenarios. The effects of filter order, bandwidth, adaptation coefficients, and sampling interval on signal reconstruction quality were investigated. Using statistical, correlation, and probabilistic analyses, an enhanced adaptive threshold detection method was developed, which accounts for the non-stationary background noise, temporal signal correlations, amplitude fluctuations, and dynamic interference parameters in real time. Results demonstrate that combining and recursively applying these filters greatly enhances the robustness of secondary radars against random and systematic interference, reduces estimation error variance, and improves radar reliability. The practical significance lies in the potential integration of these methods into intelligent air-traffic management systems, which can enhance interference immunity, aircraft identification accuracy, and overall radar surveillance quality in civil aviation.*

Keywords: *secondary radar, adaptive filtering, Kalman filter, Butterworth filter, median processing, digital signal processing, signal interference, reliability of radar surveillance.*

Introduction.

Modern radar systems operate in highly congested electromagnetic environments, where both external and internal interference significantly distort received echoes and reduce detection accuracy. To address this, digital adaptive filtering techniques are employed to boost the signal-to-noise ratio and minimize interference. This study examines three radar signal filtering methods: the median filter, the Butterworth filter, and the Kalman filter. Each method offers distinct benefits, ranging from suppressing impulsive noise to adaptively correcting random errors. The performance of the median, Butterworth, and Kalman filters was evaluated using MATLAB simulations with synthetic radar scenarios, allowing a controlled assessment of their effects on SNR, noise suppression, and target detectability.

The proposed integrated method offers dynamic noise estimation, automatic tuning of filtering parameters, and adaptive adjustment of the detection threshold in response to changing

observation conditions. This strategy decreases the probability of false alarms and increases the chances of detecting actual targets. MATLAB simulation results demonstrate that the Kalman filter, when paired with the adaptive MAD threshold, achieves the greatest signal-to-noise ratio improvement and the lowest mean-square error among the filters tested, confirming the effectiveness of the radar signal processing system.

The scientific novelty of this work lies in the development of a hybrid cascade filtering architecture that combines median, Butterworth, and adaptive Kalman filters with dynamic noise covariance estimation and MAD-based thresholding. Unlike traditional approaches that apply these filters separately, the proposed method adaptively tunes filter parameters in real time based on interference density in the 1030/1090 MHz band. This enables robust detection under FRUIT and Mode-S/ADS-B garbling conditions. A major contribution is the adaptive threshold detection algorithm that automatically adjusts the detection threshold using the median absolute deviation, accounting for non-stationary noise statistics. This integrated framework increases interference immunity while maintaining target-signal integrity and enabling stable operation under FRUIT- and garbling-dominated scenarios.

Materials and Methods.

In the 1030–1090 MHz frequency range, used for secondary radar, TCAS, and ADS-B, there is notable spectral congestion. The high interrogation density in the 1030/1090 MHz band leads to false replies (FRUIT), overlapping Mode S messages (garbling), and widespread mutual interference among airborne and ground interrogators. These issues lead to amplitude fluctuations, distorted time stamps, and decreased chances of correct message decoding [9, 11–13].

Recent studies demonstrate that modern air-traffic surveillance systems, particularly ADS-B and Mode S, are increasingly exposed to signal-level interference, intentional manipulation, and growing spectrum load in the 1030/1090 MHz band. Research shows that ADS-B channels remain vulnerable to spoofing, ghost-aircraft injection, trajectory modification, and denial-of-service attacks, while the rising density of Mode S interrogations and DAP-based replies significantly increases channel occupancy and contributes to congestion. These trends collectively indicate that the reliability of cooperative surveillance increasingly depends on robust signal-level processing capable of maintaining integrity under dense-traffic conditions. This further reinforces the need for advanced signal-processing techniques, including the filtering approaches investigated in this study [1, 3, 6].

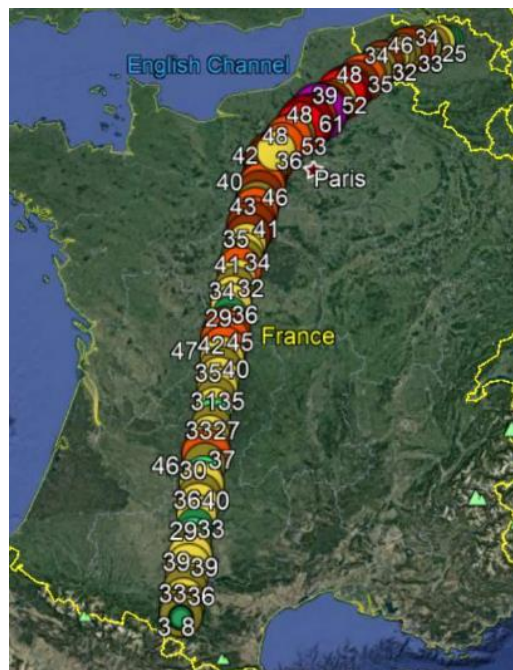


Figure 1 – Number of 1090 MHz signals recorded during flight FR2918

Flight data from flight FR2918, traveling from Barcelona to Brussels on December 16, 2020, indicated heavy congestion on the 1090 MHz frequency band. Overlapping Mode S messages (garbling) and false replies (FRUIT) were identified. These findings reaffirm the ongoing interference issues in the 1090 MHz channel and underscore the importance of adaptive filtering techniques that can dynamically counteract distortions and ensure radar data reliability. The color scale depicts the reception rate of Mode S messages at 1090 MHz, with the highest intensity over northern France, where signal interference and overlap are prevalent under spectral congestion conditions (Figure 1) [14].

In conditions where the 1030/1090 MHz band is overloaded, a combination of filtering techniques—specifically median, Butterworth, and Kalman filters—has been proposed to effectively mitigate various types of interference while maintaining the shape of the desired signals. The median filter, which operates as a nonlinear rank-based method, effectively eliminates impulse outliers without distorting the edges of signals, making it capable of handling signals affected by overlapping noise. The linear Butterworth filter is beneficial for smoothing out high-frequency noise thanks to its maximally flat amplitude-frequency response, and it is commonly utilized in the spectral processing of radar signals. Its straightforward design and reliability are key in reducing background noise. Meanwhile, the Kalman filter is used for recursive optimal state estimation, merging a priori models with incoming measurements. This cascade of filtering techniques results in a high signal-to-noise ratio, decreases the occurrence of false replies (FRUIT), and enhances the overall reliability of real-time radar surveillance [5, 10].

A comparable principle of parallel frequency–time decomposition has been successfully implemented in acousto-optic systems utilizing Bragg diffraction. In such systems, each Bragg angle corresponds to a distinct frequency sub-band, and multichannel reception is achieved by spatially distributing optical beams across a photoelastic medium. This physical analogy aligns with the sub-band decomposition and multichannel filtering approach employed in our deep learning model, where convolutional kernels act as adaptive band-pass filters that isolate overlapping SSR pulses under interference conditions [4, 15].

The combined use of these three filters creates a multi-layered intelligent filtering system, with each method addressing the limitations of the others. To assess filter effectiveness, a synthetic radar signal was produced in MATLAB with added Gaussian noise. Subsequently, median, Butterworth, and Kalman filters were applied for comparison using the radar equation (1) [8].

At the initial stage, the main radar parameters were defined as follows:

- Transmitted power (P_t): 10 kW — the radar's output power indicating the strength of the emitted signal.
- Antenna gain (G): 30 dB — how effectively the antenna transmits and receives signals.
- Wavelength (λ): 0.03 m — corresponding to the radar operating frequency.
- Radar cross section (RCS): 100 m² — the effective area describing how strongly the target reflects radar signals.
- Range vector (R): from 1 m to 50 km — a distance array divided into 1000 points for simulation.
- Noise power (NoisePower): 5 μ W — representing the random background noise level.
- Sampling frequency (F_s): 10 kHz — the rate at which the signal is sampled, determining temporal resolution.
- Signal length: 1000 samples — the number of discrete time samples in the simulated echo.
- Noise model: zero-mean Gaussian noise with variance corresponding to the specified noise power.

Performance metrics: SNR improvement, mean-square error (MSE) reduction, detection probability and false alarm rate were measured to evaluate filter effectiveness. After setting these parameters, the received signal power is modeled using the classical radar equation, which includes transmitted power, antenna gain, wavelength, radar cross-section, and range. The array

P_r shows the received power at different distances, demonstrating how the signal diminishes with increasing distance, adhering to the inverse fourth-power law ($1/R^4$) due to the double propagation loss—both signal travel to the target and back [7].

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

After defining the radar parameters, the received signal power P_r was computed numerically using the classical radar equation (1). For each value in the range vector R , a corresponding power sample was generated, forming a one-dimensional array that represents how signal strength decreases with distance. To emulate realistic operating conditions, zero-mean Gaussian noise with power NoisePower was added to the theoretical signal, producing a noisy received signal according to expression (2). All calculations were performed in MATLAB using predefined parameters and mathematical models. This numerical approach ensured a consistent simulation of the signal behavior required for subsequent filtering and comparative analysis.

$$\text{ReceivedSignal} = P_r + \text{NoisePower} \cdot \text{randn}(\text{size}(P_r)) \quad (2)$$

To process the noisy radar signal, several filtering techniques were applied sequentially. First, a matched filter was used to enhance the signal-to-noise ratio by correlating the received signal with a known reference waveform. This step emphasizes components of the signal that correspond to the expected pulse shape. Next, a median filter was employed to reduce impulsive noise and suppress narrow, high-amplitude fluctuations caused by interference. The median filter replaces each sample with the median value of its local neighborhood, improving robustness to outliers.

To further smooth the signal and suppress high-frequency noise, a Butterworth low-pass filter was applied. This filter provides a maximally flat frequency response in the passband, preserving the main structure of the radar echo while attenuating rapid fluctuations. Finally, an adaptive Kalman filter was used to dynamically estimate the true signal in the presence of noise. The Kalman filter predicts the next signal state based on a linear system model and continuously adjusts its estimates using incoming measurements [2].

This approach is particularly effective for modeling smooth radar returns, gradual range variations, and target motion. Proposed step-by-step implementation forms the foundation of an adaptive cascade filtering system, where each method performs a distinct role: the matched filter enhances useful echoes, the median filter removes impulsive distortions, and the Kalman filter adaptively stabilizes the signal and compensates for noise variations in real time [2, 7].

The adaptive Kalman filter processes the radar signal in two main stages: prediction and update. During the prediction stage, the filter estimates the next state of the signal and the associated uncertainty using equations (5) and (6). This step forecasts the expected signal dynamics before receiving new measurements. In the update stage, the filter adjusts the predicted state based on the incoming noisy measurement. The Kalman gain, calculated using equation (7), controls how strongly the new measurement influences the state estimate. A higher gain increases sensitivity to new data, while a lower gain emphasizes the predicted state. To maintain adaptability under fluctuating interference levels, the process noise covariance Q is continuously recalculated using expression (3). This enables the filter to adjust its noise model in real time, particularly under conditions where overlapping ADS-B and Mode S signals create rapidly changing interference patterns. As a result, the adaptive Kalman filter dynamically balances prediction and measurement information, providing a stable and accurate estimate of the radar signal.

The Kalman filter operates through sequential prediction and measurement-based correction of the signal state. The input data is stored in the *ReceivedSignal* array, which contains discrete

samples of the radar signal received. To maintain the filter's adaptability, the covariances of process and measurement noise are computed dynamically based on the signal's features. To enhance the algorithm's stability, an adaptive estimation of noise parameters is implemented. The process noise covariance is calculated using a specific formula that defines the adaptive parameter Q , which represents the process covariance in the Kalman filter. This approach allows the Kalman filter parameters to be automatically adjusted as the noise level varies, especially when overlapping ADS-B and Mode S messages occur. Consequently, the system continuously fine-tunes its sensitivity to noise and updates the weighting of new measurements.

$$Q = \max \left(\frac{1}{2} \text{var}(\text{ReceivedSignal}[\max(1, k - 10): k]), 10^{-6} \right) \quad (3)$$

During the adaptive adjustment of the process and measurement noise covariances, a sliding window of the last 10 measurements is used to dynamically estimate the noise level in the signal. The minimum value of 10^{-6} prevents the covariance from becoming zero, which could lead to filter instability. The measurement noise covariance is calculated using the following formula:

$$R_{\text{kalman}} = \text{NoisePower} \times 1.2 \quad (4)$$

where NoisePower is the predefined noise power level. The coefficient 1.2 provides an additional margin to account for measurement uncertainty.

At the prediction stage, the algorithm forecasts the new state of the system:

$$x_{\text{pred}} = A \cdot x_{\text{est}} \quad (5)$$

$$P_{\text{pred}} = A \cdot P \cdot A + Q \quad (6)$$

Here:

x_{est} – estimated system state at the previous step;

x_{pred} – predicted state at the next time moment;

A – state transition matrix describing how the system evolves over time;

P – covariance matrix of the estimation error (uncertainty);

P_{pred} – predicted covariance of the estimation error;

Q – process noise covariance, which determines the uncertainty level of the model.

This stage allows predicting the probable target position before obtaining a new measurement. In the 1030–1090 MHz frequency band, equations (5) and (6) describe the prediction of the target's position, velocity, and echo amplitude between successive pulses. The parameter Q , calculated according to equation (3), provides adaptation to changing interference levels, making the filter stable under Mode S/ADS-B channel congestion conditions.

At the update stage, after receiving a new measurement, the state estimate is corrected. For this purpose, the Kalman gain is calculated:

$$K = P_{\text{pred}} \cdot H / (H \cdot P_{\text{pred}} \cdot H + R_{\text{kalman}}) \quad (7)$$

where:

K – Kalman gain, determining how much the new measurement affects the updated state;

H – observation matrix linking the system state with the measurement;

R_{kalman} – measurement noise covariance.

This coefficient defines the balance between reliance on the model and the measurement: if the measurement noise is large (high R_{kalman}), the filter trusts the model prediction more; if small, it relies more on measurements. Then the state estimate is updated according to:

$$x_{\text{est}} = x_{\text{pred}} + K \cdot (\text{ReceivedSignal}(k) - H \cdot x_{\text{pred}}) \quad (8)$$

where the difference ($\text{ReceivedSignal} - H \cdot x_{\text{pred}}$) is the innovation, i.e., the prediction error. The filter corrects the predicted state by adding a weighted adjustment proportional to this error, scaled by the Kalman gain K . The covariance of the estimation error is also updated as follows:

$$P = (1 - K \cdot H) \cdot P_{\text{pred}} \quad (9)$$

After processing each measurement, the corrected state value is stored in the array `FilteredSignal_Kalman` for further analysis. This array contains the filtered signal values, free from impulse outliers and random noise. After correction, the uncertainty (estimation error) decreases — the filter becomes more confident in its results [2, 7].

To suppress high-frequency noise while preserving the informative low-frequency components of the radar echo, a 5th-order Butterworth low-pass filter was applied. The cutoff frequency F_c was selected to limit the bandwidth of the signal to the physically relevant range, while the sampling frequency F_s determined the normalized cutoff $F_c/(F_s/2)$ used in the digital filter design. The Butterworth filter provides a maximally flat response in the passband, ensuring smooth signal shaping and minimizing amplitude distortions. After computing the filter coefficients using expression (10), the filter was applied to the received signal according to equation (11), producing a smoothed version of the radar echo suitable for subsequent threshold-based detection.

A 5th-order Butterworth low-pass filter was then applied to attenuate high-frequency components while preserving the main structure of the radar echo. The filter was configured with a cutoff frequency $F_c = 2000$ Hz and a sampling frequency $F_s = 10$ kHz, which determine the normalized cutoff $F_c/(F_s/2)$ used in the digital filter design. A 5th-order filter was selected to ensure a smooth passband response and a sufficiently steep roll-off beyond the cutoff frequency.

After computing the filter coefficients according to expression (10), the filter was applied to the received signal using the digital filtering equation (11). This approach effectively reduces high-frequency noise and improves the signal-to-noise ratio (SNR) without introducing significant distortion. Compared with other filtering techniques, the Butterworth filter provides a maximally flat amplitude response in the passband, making it a reliable tool for preprocessing radar data prior to target detection.

Before applying the filter, its coefficients b and a were computed using the standard design expression:

$$[b, a] = \text{Butterworth}(n = 5, f_c/(F_s/2)) \quad (10)$$

In this expression, the first argument defines the filter order ($n = 5$), while the second argument represents the normalized cutoff frequency $F_c/(F_s/2)$, computed relative to the Nyquist frequency. Since a low-pass response is required, the filter is designed to attenuate all components above the cutoff frequency F_c .

After calculating the coefficients, the filter is applied to the received signal `ReceivedSignal` using the digital filtering equation:

$$\text{FilteredSignalButterworth} = \text{filter}(b, a, \text{ReceivedSignal}) \quad (11)$$

Applying this filtering method effectively suppresses high-frequency noise, improving the signal-to-noise ratio (SNR) without significant distortion of the useful signal. Unlike many other methods, the Butterworth filter provides a smooth frequency response, minimizing phase distortion. The obtained results demonstrate that the proposed method is an effective tool for preprocessing radar data before further analysis.

Adaptive threshold-based target detection in radar signals.

Target detection in radar systems is a complex task, especially in the presence of noise and interference. The detection process is based on comparing the filtered signal with a threshold value that is dynamically calculated considering the statistical characteristics of the signal.

The adaptive threshold (THRESHOLD) is determined using the Median Absolute Deviation (MAD), which allows the algorithm to take into account the variability of noise in the signal:

$$\text{MAD} = \text{median}(|\text{FilteredSignalKalman} - \text{median}(\text{FilteredSignalKalman})|) \times 1.4826 \quad (12)$$

Then, the detection threshold is calculated as:

$$\text{Threshold} = \text{median}(\text{FilteredSignalKalman}) + 2 \times \text{MAD} \quad (13)$$

Target detection is performed by comparing the filtered signal with the adaptive threshold. A detection is registered when the signal amplitude exceeds the threshold value, and no target is declared otherwise. This procedure produces a binary detection sequence, where samples above the threshold correspond to potential target returns.

Figure 2 illustrates the points in space where the system detects the presence of a useful signal (detection) and where the signal is absent. The X-axis (Range, m) shows the distance to the target or the observed area, while the Y-axis (Detection Status) represents the detection state. The value 1 indicates a detected signal, while 0 denotes no detection. The red vertical lines on the graph mark the moments when the system registered signal detection.

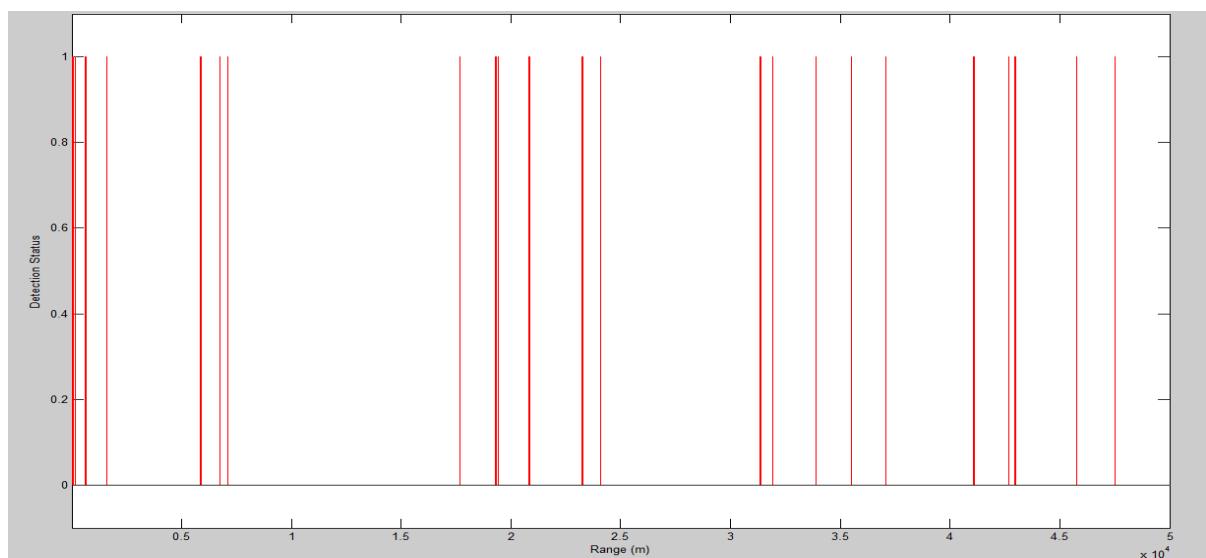


Figure 2 – Signal detections using adaptive Kalman filtering (*Signal detections using adaptive Kalman filtering. The X-axis represents the range in meters, and the Y-axis shows the detection status (1 – target detected, 0 – no detection). Red vertical lines mark detection events*)

The analysis of the graph shows that rare and narrow peaks correspond to the effective noise suppression by the Kalman filter, which allows identifying only significant signals. The filtering process eliminates false detections caused by noise in the raw data. Individual detection moments (red lines) may correspond to real reflected signals or objects.

Thus, the Kalman filter helps reduce the number of false alarms by adaptively suppressing noise. The graph confirms that the signal processing enables selective target detection compared to the original noisy data. To increase detection accuracy, the detection threshold can be adjusted in the MATLAB code via the Median Absolute Deviation (MAD) parameter. This approach ensures reliable signal detection even in complex environments with high noise and fluctuation levels [2].

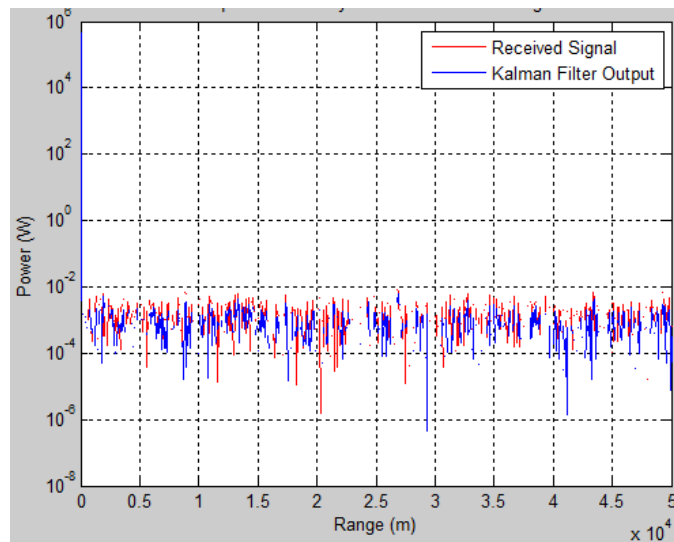


Figure 3 – Comparison of the noisy input radar signal (Received Signal) and the filtered signal after Kalman filter processing (Kalman Filter Output) in MATLAB (The X-axis shows range in meters (0–50 000 m), and the Y-axis shows signal power on a logarithmic scale, illustrating noise suppression)

The red line in Figure 3 represents the original radar signal with added Gaussian noise, while the blue line shows the signal processed by the Kalman filter. The X-axis indicates the range from the radar to the target (in meters), covering the interval from 0 to 50,000 meters. The Y-axis displays the signal power on a logarithmic scale, allowing better visualization of both weak and strong echoes.

The comparison of the two signals shows that the red “Received Signal” experiences significant amplitude fluctuations caused by noise. The power level changes chaotically with range, complicating interpretation. In contrast, the blue “Kalman Filter Output” signal has a smoothed profile and more accurately follows the expected variations in power without abrupt jumps. This confirms the efficiency of the Kalman filter in noise suppression and signal restoration.

The Kalman filter demonstrates a high ability to remove noise while preserving useful information. The difference between the red and blue curves reflects the degree of noise suppression, which is particularly important in radar systems that must detect weak targets in the presence of interference. The graph clearly shows that the Kalman filter significantly improves signal quality, reduces the influence of random fluctuations, and preserves the underlying signal structure. In radar applications, where measurement precision is crucial, such processing enhances the reliability and accuracy of target detection.

Results and Discussion.

The filtering methods were quantitatively evaluated using two metrics: improvements in signal-to-noise ratio (SNR) and reductions in mean-square error (MSE). The analysis was performed using a Monte-Carlo simulation with 50 independent runs to ensure statistical stability of the results. The clean reference signal was generated according to the radar equation, and noise-corrupted data were processed by each filtering method. Figure 4 and Table 1 summarizes the simulation results.

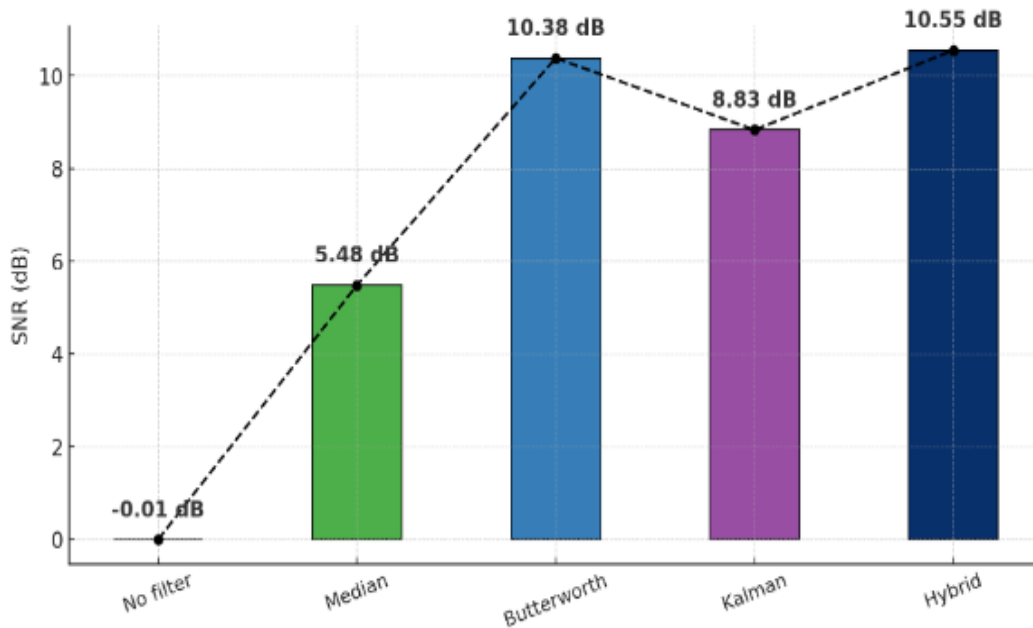


Figure 4 – Improvement of SNR for Different Filtering Methods

The median filter yields a moderate SNR increase by removing impulsive outliers, though its smoothing effect limits accuracy in some cases. The Butterworth filter achieves a significantly better SNR (>10 dB) by attenuating high-frequency components. The adaptive Kalman filter yields unbiased minimum-variance estimates but remains sensitive to changes in the noise covariance. The proposed hybrid cascade achieves the best performance in both metrics due to the complementary nature of its components: the median filter suppresses outliers, the Butterworth filter removes broadband noise, and the Kalman filter refines the final estimate (table 1).

Table 1 – Quantitative Performance Comparison of Radar Signal Filtering Methods

Filtering Method	SNR (dB)	MSE	SNR Improvement (Δ SNR)
No filtering	-0.01 dB	1.0023	–
Median filter	5.48 dB	0.2842	+5.48 dB
Butterworth filter (low-pass, 5th order)	10.38 dB	0.0924	+10.38 dB
Adaptive Kalman filter	8.83 dB	0.1318	+8.84 dB
Hybrid cascade (median + Butterworth + Kalman)	10.55 dB	0.0895	+10.56 dB

In the baseline case without filtering, the input SNR was approximately 0 dB, meaning that the signal power was nearly equal to the noise power and the radar echo was heavily distorted. After applying the proposed filtering methods, the SNR increased by about 5–10 dB, while the MSE decreased by almost an order of magnitude, indicating a substantial improvement in signal quality. The bar charts (Figure 4) visualize the SNR enhancement achieved by each filtering technique, demonstrating that the hybrid cascade filter provides the highest gain. This combined approach, with an SNR of 10.55 dB and MSE 0.0895, outperforms individual median (SNR: 5.48 dB; MSE: 0.2842), Butterworth (SNR: 10.38 dB; MSE: 0.0924), and Kalman filters (8.83 dB; MSE: 0.1318), confirming its effectiveness in suppressing noise and enhancing radar signal reliability.

Conclusion.

The study presents an analysis and modeling of adaptive radar signal filtering methods in the 1030–1090 MHz frequency band, which is typical for secondary surveillance radar, TCAS, and ADS-B systems. The research has shown that the use of a combination of median, Butterworth, and Kalman filters significantly improves signal processing reliability and reduces the influence

of both random and correlated noise. Simulation results confirm that median filtering effectively suppresses impulsive distortions, the Butterworth filter provides broadband noise reduction, and the adaptive Kalman filter delivers the lowest estimation error. Their combined use significantly strengthens interference immunity in the congested 1030–1090 MHz band. The implementation of adaptive threshold detection based on Median Absolute Deviation (MAD) allows creating a dynamically adjustable detection criterion sensitive to variations in the interference environment. This ensures the stable operation of the radar system under 1090 MHz frequency channel congestion and maintains data reliability even under overlapping Mode S and ADS-B transmissions.

References

1. Abu Al-Haija, Q., & Al-Tamimi, A. (2024). Secure aviation control through a streamlined ADS-B perception system. *Applied System Innovation*, 7(2), 27. <https://doi.org/10.3390/asi7020027>
2. Barton, D. K. (2013). *Radar equations for modern radar*. Artech House.
3. Ceballos-Gutierrez, J., Aranda-Escolástico, E., & Moreno-Salinas, D. (2025). Optimisation of spectrum use by Mode S surveillance systems through coordinated DAP extraction. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MAES.2024.3482293>
4. Hasanov, A. R., Hasanov, R. A., & Rustamov, A. R. (2018). Mathematical modeling of characteristics of an acousto-optic delay line and evaluation of their adequacy. *Instruments and Experimental Techniques*, 61(3), 411–417. <https://doi.org/10.1134/S0020441218030119>
5. Karl, W. C., Leeb, S. B., Jones, L. A., & Verghese, G. C. (1992). Applications of rank-based filters in power electronics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 7(3), 437–447. <https://doi.org/10.1109/63.145140>
6. Olive, X., Krummen, J., Figuet, B., & Alligier, R. (2024). Filtering techniques for ADS-B trajectory preprocessing. *Journal of Open Aviation Science*, 2, 1–18. <https://doi.org/10.59490/joas.2024.7882>
7. Skolnik, M. I. (1980). *Introduction to radar systems* (2nd ed.). McGraw-Hill
8. Song, F., Li, Y., Cheng, W., Dong, L., Li, M., & Liu, J. (2022). An improved Kalman filter based on long short-memory recurrent neural network for nonlinear radar target tracking. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, Article 5020443. <https://doi.org/10.1155/2022/5020443>
9. Aliyev, T. R., & Isgandarov, I. A. (2025). Enhancing ATC radar system reliability: Strategies and modern solutions. *International Journal of Aviation Science and Technology*, 6(1), 45–58. <https://doi.org/10.23890/IJAST.vm06is01.0105>
10. Wang, B. (2024). Signal processing based on Butterworth filter: Properties, design, and applications. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 97, 72–78
11. Isgandarov, I. A., & Aliyev, T. R. (2024). Review of innovative methods to improve the reliability of radar information in air traffic control. *Bulletin of Civil Aviation Academy*, 3(34), 77–88. https://doi.org/10.53364/24138614_2024_34_3_6
12. Isgandarov, I. A., & Aliyev, T. R. (2023). Development of a model of the TCAS autonomous diagnostic system using non-contact current sensors. In T. H. Karakoc, A. Yilmaz, & A. Türk (Eds.), *Novel techniques in maintenance, repair, and overhaul* (pp. 117–121). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42041-2_16
13. Isgandarov, I. A., & Aliyev, T. R. (2024). Development of prospective methods for increasing the reliability of radar information in the ATC system. In T. H. Karakoc et al. (Eds.), *Research and updates on the use of artificial intelligence in drone technology: ISUDEF 2024* (pp. 240–246). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-07678-6_43
14. Borin Kaduk Aguilar. (2021). *Analysis and optimisation of radio spectrum pollution on 1030/1090 MHz bands associated with Mode S transponders* (Bachelor thesis). Universitat Politècnica de Catalunya

15. Hasanov, A. R., Hasanov, R. A., Rustamov, A. R., Ahmadov, R. A., Suleymanov, I. I., & Sadikhov, M. V. (2022). Acousto-optic spectral-time analyzer. Applied Physics, 2, 62–71. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-2-62-71>

ЕКІНШІЛІК РАДИОЛОКАЦИЯ СИГНАЛДАРЫНЫҢ КЕДЕРГІГЕ ТӨЗІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҮШІН АДАПТИВТІ СҮЗГІЛЕРДІ ТАЛДАУ ЖӘНЕ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа. Бұл мақалада екінші реттік радиолокация диапазонына (1030/1090 МГц) тән күшті шу мен кедергілер жағдайында радиолокациялық сигналдарды өңдеу және олардың сенімділігін арттырудың заманауи тәсілдері қарастырылады. Әуе қозғалысының радарлық жүйелері әуе кеңістігін қауіпсіз және тиімді басқаруды қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады, дегенмен, олардың өнімділігі 1030/1090 МГц диапазонына тән күшті шу мен кедергілер кезінде төмендейді. Зерттеу барысында сигнал/шу қатынасын арттыруға, мақсаттық жауап параметрлерінің тұрақтылығын қамтамасыз етуге және жалған дабыл ықтималдығын азайтуға бағытталған сүзгілеу мен бейімделген сигналдық өңдеу алгоритмдері егжей-тегжейлі талданды. Объективті салыстыру жүргізу үшін классикалық және жетілдірілген цифрлық сүзгілеу тәсілдері қарастырылды. Әсіресе MATLAB ортасында жүзеге асырылып, синтетикалық деректер мен типтік радиолокациялық сценарийлердің модельдері негізінде сыналған медиандық, Баттерворт және рекурсивті Калман сүзгілерін салыстырмалы зерттеу ерекше назарға алынды. Сүзгінің реті, өткізу жолағы, бейімделу коэффициенттері мен дискреттеу қадамының сигналды қалпына келтіру сапасына әсері зерттелді. Статистикалық, корреляциялық және ықтималдық талдау нәтижесінде фондық шудың бейстационарлы табиғатын, сигналдар арасындағы уақытша корреляцияны және амплитудалық тербелістерді ескеретін бейімделген табалдырықтық анықтау әдісі жетілдірілді. Алынған нәтижелер біріктірілген және рекурсивті сүзгілерді қолдану екінші реттік радиолокаторлардың кездейсоқ және жүйелік кедергілерге төзімділігін едәуір арттыратынын, бағалау қателіктерінің дисперсиясын азайтатынын және радиолокациялық ақпараттың сенімділігін жоғарылататынын көрсетті. Зерттеудің практикалық құндылығы — ұсынылған әдістерді азаматтық авиацияның интеллектуалды әуе қозғалысын басқару және радиолокациялық бақылау жүйелеріне енгізу арқылы кедергіге төзімділікті, ұшақтарды сәйкестендіру дәлдігін және радиолокациялық бақылау сапасын арттыру мүмкіндігімен айқындалады.

Түйін сөздер: екінші реттік радиолокация, бейімделген сүзгілеу, Калман сүзгісі, Баттерворт сүзгісі, медиандық өңдеу, цифрлық сигналдарды өңдеу, сигналдардың интерференциясы, радиолокациялық бақылаудың сенімділігі.

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИГНАЛОВ ВТОРИЧНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Аннотация. В данной статье рассматриваются современные подходы к обработке и повышению достоверности радиолокационных сигналов в условиях сильных шумовых и помеховых воздействий, характерных для диапазона вторичной радиолокации (1030/1090 МГц). Системы радиолокационного контроля воздушного движения играют важнейшую роль в обеспечении безопасного и эффективного управления воздушным пространством, однако их производительность снижается в условиях сильного шума и помех, типичных для диапазона 1030/1090 МГц. В работе проведён детальный анализ алгоритмов фильтрации и адаптивной обработки радиолокационных сигналов, направленных на повышение отношения сигнал/шум, стабилизацию параметров целевых откликов и уменьшение вероятности ложных срабатываний при регистрации отметок. Для более

объективного сравнения рассмотрены как классические, так и усовершенствованные подходы цифровой фильтрации. Особое внимание уделено сравнительному исследованию медианного фильтра, фильтра Баттерворта и рекурсивного фильтра Калмана, реализованных и протестированных в среде MATLAB с использованием синтетически сгенерированных данных и имитационных моделей типичных радиолокационных сценариев. При этом исследовались влияние порядка фильтра, полосы пропускания, коэффициентов адаптации и временного шага дискретизации на качество восстановления сигнала. На основе статистического, корреляционного и вероятностного анализа предложен усовершенствованный метод адаптивного порогового обнаружения целей. Полученные результаты подтверждают, что потенциальное использование комбинированных и рекурсивных фильтров позволяет значительно повысить устойчивость вторичных радиолокаторов к случайным и системным помехам, снизить дисперсию ошибок оценки и повысить достоверность радиолокационной информации. Практическая ценность работы заключается в возможности внедрения предложенных методов в интеллектуальные системы обработки данных управления воздушным движением для повышения помехоустойчивости, точности идентификации воздушных судов и улучшения качества радарного наблюдения в гражданской авиации.

Ключевые слова: вторичная радиолокация, адаптивная фильтрация, фильтр Калмана, фильтр Баттерворта, медианная обработка, цифровая обработка сигналов, интерференция сигналов, достоверность радиолокационного наблюдения.

Information about the authors

Afig Hasanov	Doctor of Technical Sciences, Professor. National Aviation Academy, Azerbaijan, Baku. E-mail: ahesenov@naa.edu.az
Islam Isgandarov	PhD, Professor, Head of Department at the National Aviation Academy, Azerbaijan, Baku E-mail: iisgandarov@naa.edu.az
Teymur Aliyev	Doctoral candidate. National Aviation Academy. Azerbaijan, Baku. E-mail: teymour.aliyev@gmail.com

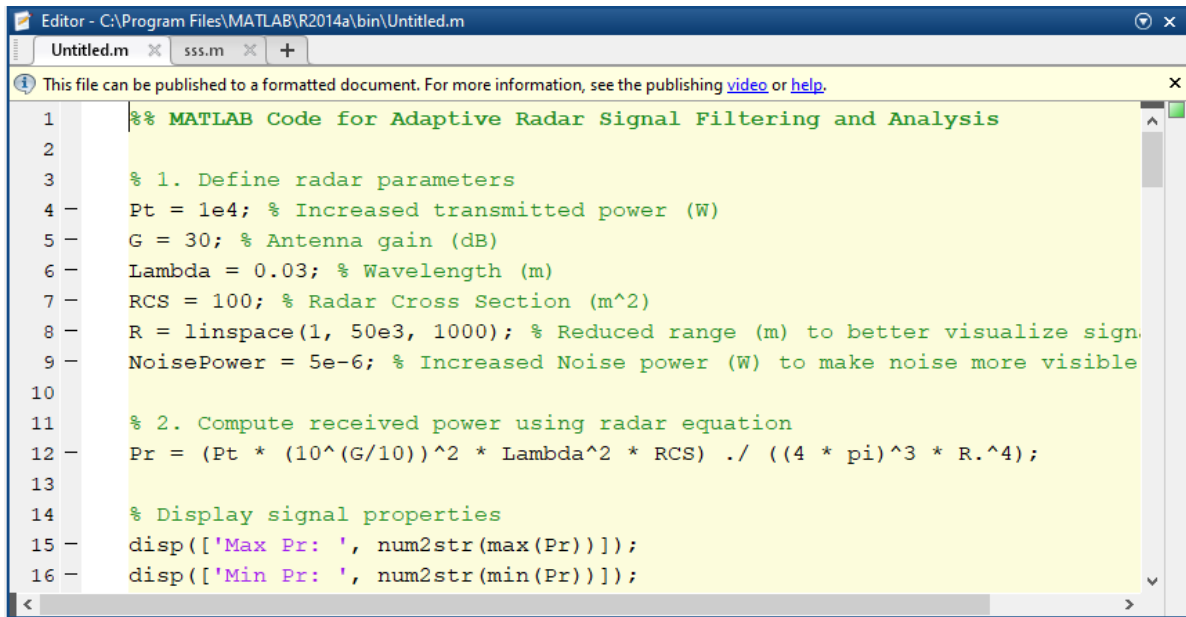
Сведения об авторах

Афиг Гасанов	доктор технических наук, профессор. Национальная авиационная академия, Азербайджан, Баку. E-mail: ahesenov@naa.edu.az
Ислам Искендеров	Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Национальной авиационной академии, Азербайджан, Баку E-mail: iisgandarov@naa.edu.az
Теймур Алиев	Докторант Национальной авиационной академии, Азербайджан, Баку, E-mail: teymour.aliyev@gmail.com

Авторлар туралы мәлімет

Афиг Гасанов	техника ғылымдарының докторы, профессор. Ұлттық авиация академиясы, Әзірбайжан, Баку. E-mail: ahesenov@naa.edu.az
Ислам Искендеров	PhD, профессор, Ұлттық авиация академиясының кафедра меңгерушісі, Әзербайжан, Баку E-mail: iisgandarov@naa.edu.az
Теймур Алиев	Ұлттық авиация академиясының докторанты, Әзірбайжан, Баку, E-mail: teymour.aliyev@gmail.com

Appendix A

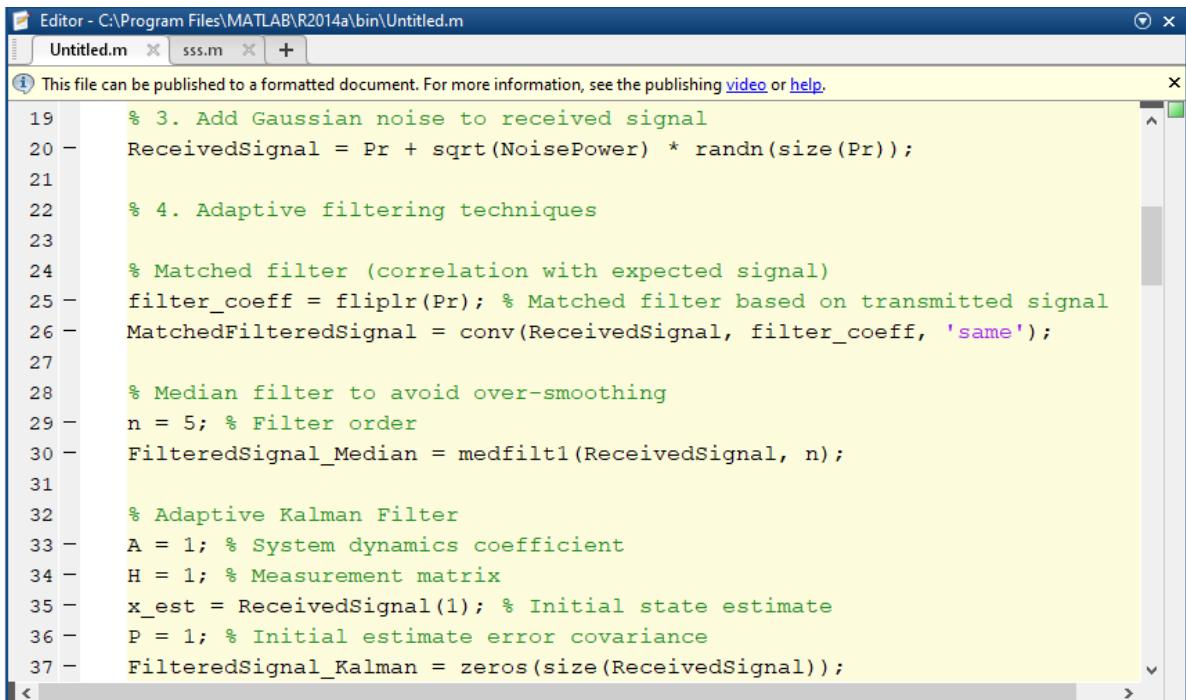


```

Editor - C:\Program Files\MATLAB\R2014a\bin\Untitled.m
Untitled.m x sss.m x +
This file can be published to a formatted document. For more information, see the publishing video or help.
1 %% MATLAB Code for Adaptive Radar Signal Filtering and Analysis
2
3 % 1. Define radar parameters
4 - Pt = 1e4; % Increased transmitted power (W)
5 - G = 30; % Antenna gain (dB)
6 - Lambda = 0.03; % Wavelength (m)
7 - RCS = 100; % Radar Cross Section (m^2)
8 - R = linspace(1, 50e3, 1000); % Reduced range (m) to better visualize sign.
9 - NoisePower = 5e-6; % Increased Noise power (W) to make noise more visible
10
11 % 2. Compute received power using radar equation
12 - Pr = (Pt * (10^(G/10))^2 * Lambda^2 * RCS) ./ ((4 * pi)^3 * R.^4);
13
14 % Display signal properties
15 - disp(['Max Pr: ', num2str(max(Pr))]);
16 - disp(['Min Pr: ', num2str(min(Pr))]);

```

Code fragment for calculating received power according to Equation (1)



```

Editor - C:\Program Files\MATLAB\R2014a\bin\Untitled.m
Untitled.m x sss.m x +
This file can be published to a formatted document. For more information, see the publishing video or help.
19 % 3. Add Gaussian noise to received signal
20 - ReceivedSignal = Pr + sqrt(NoisePower) * randn(size(Pr));
21
22 % 4. Adaptive filtering techniques
23
24 % Matched filter (correlation with expected signal)
25 - filter_coeff = fliplr(Pr); % Matched filter based on transmitted signal
26 - MatchedFilteredSignal = conv(ReceivedSignal, filter_coeff, 'same');
27
28 % Median filter to avoid over-smoothing
29 - n = 5; % Filter order
30 - FilteredSignal_Median = medfilt1(ReceivedSignal, n);
31
32 % Adaptive Kalman Filter
33 - A = 1; % System dynamics coefficient
34 - H = 1; % Measurement matrix
35 - x_est = ReceivedSignal(1); % Initial state estimate
36 - P = 1; % Initial estimate error covariance
37 - FilteredSignal_Kalman = zeros(size(ReceivedSignal));

```

MATLAB code for implementing adaptive radar signal filtering methods: matched, median, and Kalman filters

```

Editor - C:\Program Files\MATLAB\R2014a\bin\Untitled.m
Untitled.m x sss.m x +
This file can be published to a formatted document. For more information, see the publishing video or help.
38
39 - for k = 1:length(ReceivedSignal)
40     % Adaptive process noise covariance
41     Q = max(var(ReceivedSignal(max(1, k-10):k)) * 0.5, 1e-6);
42     R_kalman = NoisePower * 1.2; % Adaptive measurement noise
43
44     % Prediction step
45     x_pred = A * x_est;
46     P_pred = A * P * A + Q;
47
48     % Update step
49     K = P_pred * H / (H * P_pred * H + R_kalman);
50     x_est = x_pred + K * (ReceivedSignal(k) - H * x_pred);
51     P = (1 - K * H) * P_pred;
52
53     % Store result
54     FilteredSignal_Kalman(k) = x_est;
55 end
56

```

Algorithm of the adaptive Kalman filter

```

Editor - C:\Program Files\MATLAB\R2014a\bin\Untitled.m
Untitled.m x sss.m x +
This file can be published to a formatted document. For more information, see the publishing video or help.
59
60 % Butterworth low-pass filter
61 Fc = 2000; % Cutoff frequency (Hz)
62 Fs = 10e3; % Sampling frequency (Hz)
63 [b, a] = butter(5, Fc/(Fs/2), 'low');
64 FilteredSignal_Butterworth = filter(b, a, ReceivedSignal);
65

```

Code for implementing the Butterworth filter to suppress high-frequency noise

```

Editor - C:\Program Files\MATLAB\R2014a\bin\Untitled.m
Untitled.m x sss.m x +
This file can be published to a formatted document. For more information, see the publishing video or help.
113
114 % 6. Adaptive detection threshold
115 MAD = median(abs(FilteredSignal_Kalman - median(FilteredSignal_Kalman))) * 1.4826;
116 Threshold = median(FilteredSignal_Kalman) + 2 * MAD;
117
118 % 7. Detection process using Kalman filtered signal
119 Detections = FilteredSignal_Kalman > Threshold;
120 disp(['Total Detections: ', num2str(sum(Detections))]);
121 figure('Units','normalized','Position',[0 0 1 1]);
122 stem(R, Detections, 'r', 'Marker', 'none');
123 title('Detection Results using Kalman Filter (1 = Detection, 0 = No Detection)');
124 xlabel('Range (m)'); ylabel('Detection Status');
125 grid on;
126

```

Code for target threshold detection using the Kalman filter



УДК 656.7

МРНТИ 73.37.17

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_2

К.Т. Кошеков¹, К. Б. Алдамжаров¹, Я. М. Курбанов¹, В.М. Курбанов¹

¹АО «Академия Гражданской Авиации», Республика Казахстан, город Алматы

*E-mail: kurbanov_yakub@list.ru

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ДАННЫХ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ

***Аннотация.** Цель исследования изучить влияние качества данных, сопряженных с ним факторов и формализовать логические и математические связи между аргументами функции обучения нейронной сети или искусственного интеллекта для демонстрации взаимосвязи с безопасностью полетов.*

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи. Первое - оценить текущее состояние вопроса применения искусственного интеллекта в процедурах предполетного осмотра, а также ремонта и технического обслуживания воздушного судна. Это необходимо для определения уровня технологической интеграции нейронных сетей и искусственного интеллекта. Второе - на основе полученных данных необходимо определить актуальные платформы для обучения искусственного интеллекта. Это позволит определить дополнительные технические аргументы, влияющие на конечный результат обучения искусственного интеллекта. Третье - формализовать логико-математическую связь между влияющими факторами и конечным результатом. Определить дополнительные влияющие факторы и также формализовать. Формальный способ записи позволяет строить процедурно-последовательную линию связи для мониторинга рисков в отношении безопасности полетов.

Для решения задач применялись следующие методы. Метод наблюдения, который был применен по отношению информации, которая была собрана в ходе отслеживания хронологии применения различных автоматизированных технологий оптического обнаружения неисправностей. Декомпозиция, которая позволила отделить от комплексной технологии функциональную часть компьютерной программы, которая определяет неисправности. Сравнительный анализ, который позволил определить сильные и слабые стороны различных нейронных сетей и архитектур технических систем для этих нейронных сетей и искусственного интеллекта Математический анализ, который позволяет формализовать выражения, характеризующие влияние аргументов комплексной функции и определить аддитивность и мультипликативность комплексной функции. Диверсионный и функциональный анализы, которые позволяют определить взаимосвязи между аргументами комплексных функций и конечной комплексной функции безопасности полетов.

В результате были представлены выражения, которые отражают логико-математическую связь в функционально-последовательной передаточной линии связи от аргументов нейронной сети и искусственного интеллекта до комплексного показателя безопасности полетов.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, нейронные сети, предполетный осмотр, модели искусственного интеллекта, сравнительный анализ, безопасность полетов.*

Введение.

Оценка текущего состояния. В настоящее время авиационная индустрия является самой нагруженной по отношению к затратам человеческого капитала. С целью рационализации затрат человеческого капитала авиакомпания компания KLM начала применение дронов и искусственного интеллекта в предполетном осмотре. В рамках эксперимента, начавшегося в 2015 году, были получены следующие достижения: автоматический предполетный осмотр и построение трехмерного цифрового двойника. Компания Mainblades планирует внедрение искусственного интеллекта в процесс предполетного осмотра для обнаружения неисправностей воздушного судна [1, 2].

Аналогичную технологию разработала авиакомпания Korean Air. Авиакомпания применила группу беспилотных летательных аппаратов с дистанционным управлением для выполнения предполетного осмотра. В отличие от эксперимента партнерства KLM и в партнерстве с Mainblades дроны были применены только для оптического обнаружения неисправностей. Однако результат применения сократил время процедуры предполетного осмотра на 60% [3].

Цель исследования. Рассматривая описанный опыт авиакомпаний необходимо отметить факт внедрения средств автоматизации, в частности искусственного интеллекта. Искусственный интеллект в настоящее время представляет из себя программное обеспечение, которое решает параметрическую задачу, где количество параметров достигает 1,8 триллионов [4]. Несмотря на то, что большинство моделей искусственного интеллекта являются открытыми и доступны для скачивания и обучения, коммерческие обученные модели являются закрытыми, что в свою очередь не позволяет обеспечить прозрачность процесса применения коммерческих моделей, а также не позволяет определить весовые коэффициенты всех этих параметров, которые оказывают влияние на конечный результат, выдаваемый этой моделью.

Исходя из описанного целью исследования становится разработка предложения по снижению уровня риска, связанного с качеством данных и возникающего при применении искусственного интеллекта в процедурах предполетного осмотра.

Задачи исследования. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи с применением соответствующих методов. Провести аналитическую работу с применением следующих методов. Сравнительный анализ закрытых и открытых моделей искусственного интеллекта. Позволяет определить уровень технологического совершенства той или иной доступной для исследовательских целей моделей. Позволит определить перспективу применения каждой изученной модели в рамках объективизации и автоматизации предполетного осмотра. Структурный анализ автоматизированной техногенной системы позволяет выделить структурную взаимосвязь элементов в рамках комплексной системы предполетного осмотра. Функциональный анализ, позволяет определить функциональную взаимосвязь между структурными элементами, а также отследить движение данных между структурными элементами. При появлении сбоев в системе, позволит определить уязвимые элементы системы в ходе работы. Анализ производственных рисков применения техногенной системы с искусственным интеллектом позволяет определить наиболее критические уязвимости в применении автоматизированной системы. Что позволит в перспективе разработать меры по снижению рисков, связанных с применением техногенной системы. Синтез рекомендаций по безопасности на основе выявленных рисков, преимуществ и недостатков позволяет определить основные направления по проведению глубоких исследований и разработке рекомендаций по безопасной эксплуатации автоматизированной системы предполетного осмотра.

Материалы и методы исследования.

Для того, чтоб провести сравнительный анализ применения между открытой и закрытой моделями искусственного интеллекта, изучим жизненный цикл искусственного интеллекта на примере YOLO, которая является доступной и применяется в различных секторах компьютерного зрения, в том числе может применяться в предполетном осмотре. В настоящее время в АО «Академия Гражданской Авиации» уже выполнено экспериментальное обучение модели YOLO версии пакета «n» для выполнения предполетного осмотра. Также обучение ведется на платформе Roboflow, которая имеет одноименную модель — Roboflow.

В отличие от YOLO модель Roboflow имеет частично закрытую архитектуру, которую можно задействовать для корректировки уже обученной модели или модели YOLO. Предварительный набор обучающих данных содержит в себе 234 изображения, распределенных на три ветви: обучающие данные, валидационные данные и подтверждающие данные. Всего было определено 14 классов объектов для обнаружения. Как видно на рисунке 1, модель Roboflow 3 оказалась более точной.

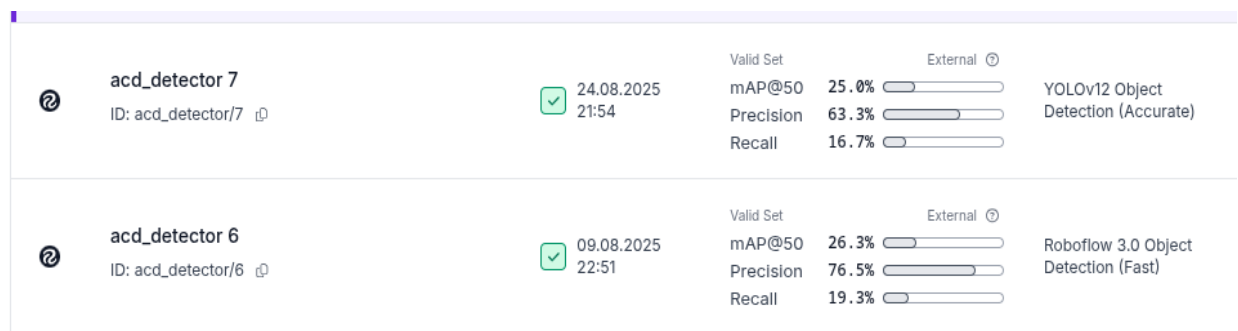


Рисунок 1 — Точность (precision) моделей компьютерного зрения

При этом даже были приняты соответствующие меры по выбору режима обучения. Как показал эксперимент, закрытая архитектура вероятно содержит дополнительную аргументацию в математических моделях, которая способствует повышению точности прогнозирования модели компьютерного зрения даже в режиме быстрого обучения по отношению к открытой архитектуре YOLO 12, в режиме повышенной точности.

Стоит отметить, что объем данных не является исчерпывающим и не содержит достаточно материалов для обучения высокоточной модели. Также одним из ключевых моментов обучения модели является качество данных. Качество данных напрямую зависит от разрешения фотографий. Кроме этого, также угол съемки влияет на качество изображения искомого объекта на снимке. Таким образом формируется перечень факторов, объективно влияющих на качество обучения модели. Запишем как функцию:

$$F = f(P_{res} \times P_{ang} \times P_{rep} \times P_{det}) \quad (1)$$

где F - комплексная параметрическая математическая функция, характеризующая влияние факторов на обучение модели;

P_{res} - аргумент комплексной математической функции, определяющий влияние разрешения на обучение модели;

P_{ang} - аргумент комплексной математической функции, определяющий влияние угла съемки на обучение модели;

P_{rep} - аргумент комплексной математической функции, определяющий влияние повторяемости объекта в наборе данных на обучение модели;

P_{det} - аргумент комплексной математической функции, определяющий влияние детализации изображения искомого объекта на обучение модели.

В рамках рассматриваемого контекста аргументов справедливо изучить метрики, предоставляемые программными средами обучения моделей и выделить ключевые характеристики.

Для начала на рисунке 2 представим графы метрик обучения модели Roboflow 3

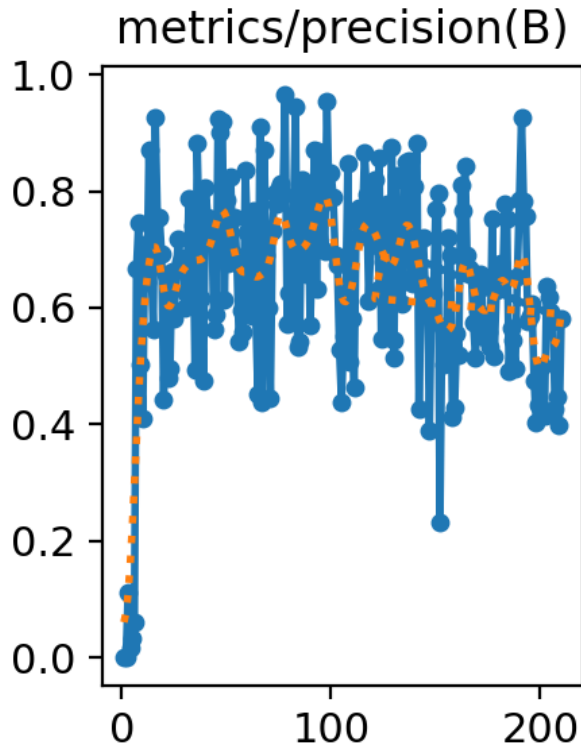


Рисунок 2 — График метрик точности обученной модели Roboflow

График точности синим цветом указывает фактические результаты для каждой из 234 итераций по оси X и вероятности определения объекта по оси Y. Результирующий график составляет некоторое поле значений, большая часть которых находится в промежутке от 0,5 до 0,8. Пунктирной линией указано сглаженное значение параметра точности, которое находится в промежутке между 0,6 и 0,8. Однако стоит отметить, что пиковая точность значений находится до итерации изображений с номером 100. На итерации в промежутке между 100 и 200 выделяется сильный провал. Этот провал характеризует низкое качество обучения, что в первую очередь связано с низким качеством обучающих материалов. Основанием для этого утверждения является предшествующий опыт обучения этой модели, результаты которой были равны значениям, приведенным на рисунке 3. Ключевым негативным аргументом является сама классификация, так как были указаны только классы повреждений. В более новых версиях применялась более строгая классификация, которая включает в себя часть конструкции самолета и тип повреждения, что существенно позволило сократить математические погрешности в метрике точности по отношению к видам повреждения для некоторых отдельных классов искомого объектов. Прибегая к более жесткой системе классификации повреждений можно повысить результативность модели.

















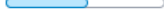

	ac_damage_detector 5 ID: ac_damage_detector/5 	 10.02.2025 18:32	mAP@50 13.3%  Precision 31.1%  Recall 9.0% 	Roboflow 3.0 Instance Segmentation (Fast)
	ac_damage_detector 4 ID: ac_damage_detector/4 	 08.02.2025 01:12	mAP@50 20.9%  Precision 43.4%  Recall 21.5% 	Roboflow 3.0 Instance Segmentation (Fast)
	ac_damage_detector 1 ID: ac_damage_detector/1 	 07.02.2025 16:23	mAP@50 32.2%  Precision 51.3%  Recall 36.3% 	Roboflow 3.0 Instance Segmentation (Fast)

Рисунок 3 — Значения точности (precision) предшествующих моделей

Ниже приведем формулы для предыдущей и актуальной версий классификации объектов для обучения модели.

$$D_{type} \Rightarrow C_{co} \quad (2)$$

где C_{co} - предшествующее множества классов объектов;

D_{type} - класс типа повреждений воздушного судна.

$$D_{type} \cup D_{place} \Rightarrow C_{cn} \quad (3)$$

где C_{cn} - актуальное множество классов объектов;

D_{place} - расположение повреждений на воздушном судне.

Если в первом случае мы получаем линейную функцию вида $y = x$, то во втором случае вид функции преобразовывается в $y = x_1 \times x_2$. Даже в таком редуцированном виде можно понять, что классификация объектов может быть расширена за счет факторов, приведенных в первой формуле. В конечном итоге множество классов будет увеличиваться. В конечном виде мы будем иметь формулу следующего вида:

$$C_{ca} = f(\sum_1^n X_1 + \dots + \sum_1^n X_m) \quad (4)$$

где C_{ca} - множество классов;

X - класс искомого объекта;

n - количество значений, которые могут принять классы, для каждого класса определяется индивидуально;

m - количество учитываемых классов.

Проанализируем возможность ограничения количества аргументов и их значений для сокращения значения аргументов, которые могут потребовать дополнительной вычислительной мощности и затян timer обучения модели. К текущему моменту получено шесть аргументов: разрешение, угол съемки, повторяемость, детализация, тип, расположение. Фактически приведенные аргументы математически ограничиваются только тем, что их значения принадлежат множеству позитивных рациональных и целых чисел.

Исходя из сказанного получается, что фактически множество аргументов и принимаемых значений может быть бесконечным в рамках математического выражения, однако в рамках действующей практики и приведенной аргументации нет технической потребности в увеличении сложности математической функции аргументации качества обучения от качества данных. Перечисленные шесть аргументов способствуют качественному распределению данных, что в конечном итоге позволяет повысить уровень точности конечной модели, которая будет обучена при помощи этих данных.

Теперь, после вывода общей гипотезы о влиянии качества данных на обучение, перейдем к рассмотрению модели YOLO 12 версии пакета «n».

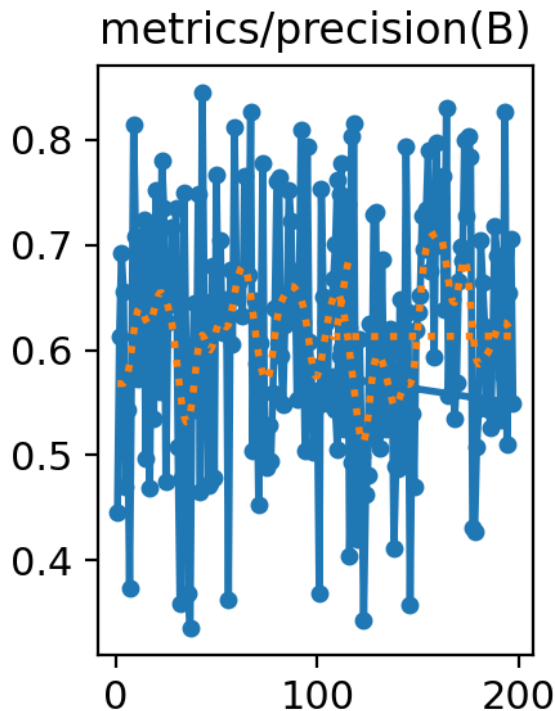


Рисунок 4 — График метрик точности обученной модели YOLO 12 n

График итераций (OX) имеет широкий разброс данных по вероятности распознавания объекта (OY), преимущественно в диапазоне от 0,2 до 0,8. Сглаживающая характеристика оранжевым пунктиром расположена преимущественно в диапазоне от 0,5 до 0,7. Если сравнивать с моделью Roboflow то разброс показателей значительно больше, что в конечном итоге демонстрирует не достаточную точность в обучении модели, это может демонстрировать низкую аргументации в отношении математического приближения. Однако стоит упомянуть, что все настройки для модели YOLO использованы по умолчанию и не содержат дополнительной математической аргументации, в виде настройки разрешения, изменения количества циклов, преобразования изображений и иное, что может оказать влияние.

Теперь рассмотрим дополнительные факторы, которые могут оказать влияние, но в этом случае не проявились, так как не были связаны. Так как в настоящее время в области искусственного интеллекта, который задействован в графической обработке, лидирующие позиции занимает компания nvidia, то отметим, что пакет программного обеспечения cuda не был задействован, вместо этого были задействованы вычислительные мощности профессорского сервиса Roboflow. Для обучения были задействованы процессоры Jetson Orin NX [5]. С учетом этого рассмотрим факт того, что значительная часть программного обеспечения, в том числе и нейросетей и искусственного интеллекта разрабатывается на процессорах с архитектурой x64 от AMD и Intel, а также ARM от nvidia. При этом каждый процессор имеет собственный набор инструкций к выполнению программ [6, 7, 8].

Одно и тоже программное обеспечение может иметь разную скорость выполнения на разных процессорах. Таким образом получается, что одна и также модель будет иметь разную скорость выполнения, однако если скорость выполнения влияет только на время обучения, то еще стоит вспомнить, что разные процессоры имеют разные наборы инструкций по выполнению кода, тем самым качество обучения может измениться в зависимости от набора инструкций, которые применяются в процессоре. Инструкции,

поддерживаемые процессором на прямую, определяют способ процессорных вычислений, там самым регламентируют вектор направленности вычислений и степень точности вычислений.

Исходя из этого предположения также стоит отметить, что, будучи лидером в вычислениях нейронных сетей и искусственного интеллекта и применяя архитектуру ARM компания NVIDIA задает темп разработки программного обеспечения с процессорами архитектуры ARM. Хотя фактически с применением языков высокого уровня абстракции, с последующей интерпретацией без компиляции позволяет переносить программное обеспечение на любую аппаратно-программную платформу, возникает вероятность влияния аппаратно-программной платформы непосредственно на результаты обучения и возникает дополнительный слой, который стоит между качественными данными и конечным результатом — обученной моделью. Схематично это можно отобразить следующим образом, смотреть на рисунок 5.

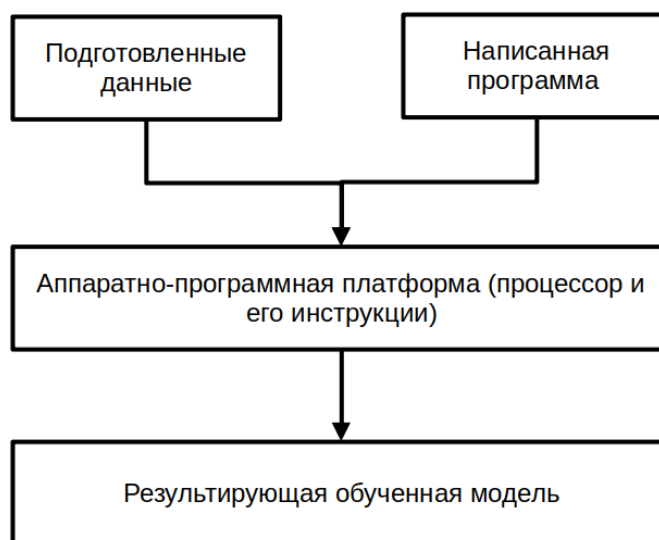


Рисунок 5 — Схема влияющих слоев на этапе обучения модели нейронной сети

В контексте рассматриваемого комплекса, состоящего из данных для обучения, написанной программы обучения на языке высокого уровня абстракции, а также аппаратно-программного комплекса, который обучает нейронную сеть, можно добавить еще одну комплексную функцию, которая оказывает влияние, но не связывает базу данных с моделью на прямую, а исходит из промежуточного этапа и фактически является дополнительной независимой самостоятельной функцией, которую необходимо учитывать. Основным аргументом в пользу того, что эту функцию необходимо учитывать, является точность компьютерных вычислений с плавающей точкой. Ключевой параметр этого аргумента заключается в том, что координаты объекта на изображении в подготовленных данных задаются в виде числе с десятичной дробной частью, что наглядно и напрямую демонстрирует потребность в высокоточных вычислениях, что зависит от архитектуры процессора и набора инструкций, по которым он выполняет вычисления. Также это можно отследить в вычислениях при обучении модели при определении метрик, где вычисляется площадь и доля перекрытия объектов на разных изображениях, а также степень совпадения тестовых данных с валидационными. Необходимо отметить, что при корректной настройке тестовые и валидационные наборы данных обязаны быть разными, что и было выполнено при проведении эксперимента.

В подтверждение гипотезы о том, что аппаратно-программная платформа влияет на конечную модель, был проведен дополнительный эксперимент, в котором сравнивается

локально обученная модель YOLO 11 n на компьютере с процессором Intel архитектуры x64 и модель и модель Roboflow на платформе с процессором Jetson Orin NX с архитектурой ARM. Результаты обучения видны на рисунке 6













MODEL NAME	UPDATED	METRICS	TYPE
 local_trained_2 3 ID: local_trained_2/3	 21.09.2025 19:07	Valid Set External  mAP@50 13.4%  Precision 63.1%  Recall 14.3% 	YOLOv11 Instance Segmentation (Accurate)
 local_trained_2 2 ID: local_trained_2/2	 21.09.2025 18:38	Valid Set External  mAP@50 17.2%  Precision 15.3%  Recall 22.2% 	Roboflow 3.0 Instance Segmentation (Accurate)

Рисунок 6 — Результаты обучения на локальной и онлайн платформах с разной аппаратно-программной архитектурой

Не менее важным параметром является стартовая точка обучения, а именно применение предварительно обученной модели и полностью не обученной модели. Во время начала обучения, пользователю на выбор предоставляется возможность начать обучения с начальной позиции, где в модели не содержится никакой предварительной записи и начать обучение собственной модели с точки предварительного обучения, где в зависимости от вида модели предлагается разный уровень точности модели в стартовой позиции. Для YOLO 11 n этот уровень составляет 39,5 %, а для Roboflow 44,2% [9, 10]. При этом во время проведения эксперимента локально обученная модель YOLO 11 получила точность 15%, онлайн обученная модель YOLO 11 получила точность 63%, а модель Roboflow получила точность. Рассматривая полученный результат можно прийти к выводу, что закрытая архитектура уступила место открытой. Одним из ключевых моментов является факт того, что открытую архитектуру отслеживает большое сообщество, которое используем обратную связь для совершенствования алгоритмов программного обеспечения, в то время как закрытая архитектура использует интеллектуальные ресурсы ограниченного количества людей. Также подчеркнем, что при обучении была поставлена задача сегментации, а не обнаружения объектов, тем самым подчеркивается унификация модели YOLO по отношению к модели Roboflow. Обратим внимание на рисунок 7.

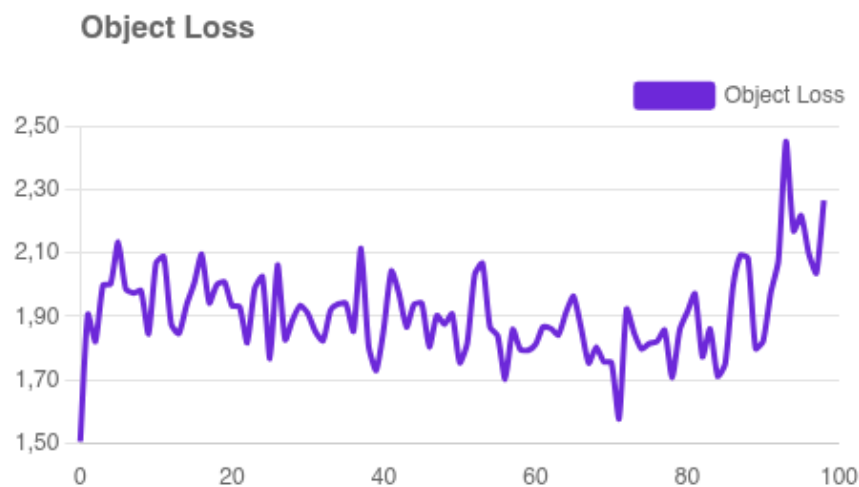


Рисунок 7 — График потери объектов во время обучения

По оси X – прогресс обучения в процентах, по оси Y – количество «потерянных» объектов. Дополнительным фактором является распределение в банке данных. Как и было отмечено ранее распределение требует наличия трех категорий данных: обучающие, достоверные и проверяющие. С учетом этого необходимо контролировать наличие соответствующих данных в каждой категории. Необходимо наличие как минимум одного объекта из каждого класса в каждой категории данных. Наличие или отсутствие класса объекта является бинарной функцией. При этом весовой коэффициент этой функции по отношению к комплексной может определяться как отношение количества объектов в классе к общему числу объектов во всех классах. Таким образом появляется некоторая функция классов объектов, которая является комплексной, и она же является аргументом в комплексной функции более высокого порядка, характеризующей влияние качества данных на результаты обучения модели. Математически эту комплексную функцию можно записать так:

$$C_{class} = \sum_1^n (k \times B) \quad (5)$$

где C_{class} - комплексная функция, которая характеризует влияние распределения данных в банке данных при помощи бинарного состояния наличия данных. k - коэффициент, отражающий отношение наличия объектов одного класса к общему числу объектов во всех классах B - бинарное состояние наличия или отсутствия объекта класса в разделе данных.

При этом стоит отметить, что бинарное состояние будет равно логической единице, если объект класса находится во всех трех категориях данных.

Результаты и их обсуждение.

С учетом всего описанного можно выделить следующие результаты: Получена формальная запись комплексной функции, характеризующей влияние качества данных, а также второстепенных сопряженных и сопутствующих факторов. Комплексная функция в выражении 4 приведена к виду многочлена с однородными одночленами. Также дополнительно определена функция сопряженного фактора, который не связан с качеством данных, но связан с их распределением, что позволяет определять фактор как значимый для обучения модели.

Математические выражения составлены на основе данных, которые были проверены в ходе эксперимента на онлайн платформе и на локальном компьютере, что в конечном итоге позволило вывести гипотезы о влияющих факторах. В конечном результате, выражениях 4 и 5, представлены только подтвердившиеся гипотезы, проверенные в ходе ряда практических экспериментов.

Полученные выражения могут лечь в основу математической модели, которая на более высоком уровне будет отражать принцип действия системы предполетного осмотра воздушного судна. Оба выражения являются аргументами более комплексной функции, характеризующей безопасность полетов. Согласно закону дистрибутивности можно записать следующую функцию по показателю безопасности полетов:

$$F_{safety} = C_{class} + C_{ca} \quad (6)$$

где F_{safety} - комплексная функция безопасности полетов.

Таким образом комплексная функция имеет математическую логическую связь с данными для обучения модели нейронной сети или искусственного интеллекта для обнаружения внешних неисправностей воздушного судна. Что в конечном итоге позволяет определять риски в процессе применения нейронной сети в предполетном осмотре. При таких наглядных демонстрациях взаимосвязей между аргументами обучаемой модели и комплексной функции можно определить последовательность, которая может нести риски

и служить предпосылкой для авиационных инцидентов или происшествий. Наглядно можно привести диаграмму, которая будет демонстрировать закон дистрибутивности для выражений 4, 5 и 6. Диаграмма приведена на рисунке 8.

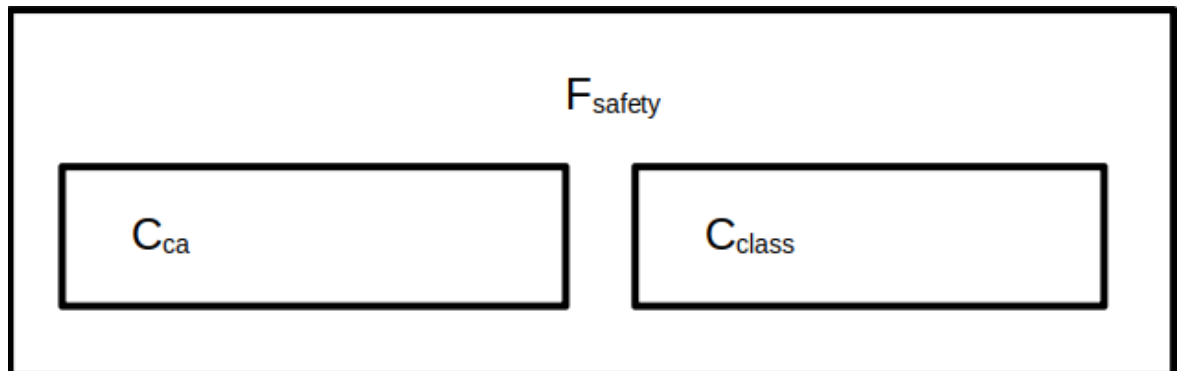


Рисунок 8 — Закон дистрибутивности для аргументов и комплексных функций обучения модели и функции безопасности полетов

Заключение.

В заключении статьи по проведенному исследованию можно сделать следующие выводы. Качество данных напрямую влияет на результаты обучения модели, что можно было увидеть на примерах датасетов с разными способами классификации распознаваемых образов.

Качество данных является комплексной функцией высокого класса комплексности. Так как во многом есть ряд переменных, которые были частично изучены в представленной статье. Также были представлены формализованные взаимосвязи переменных и конечного показателя точности распознавания.

Каждый аргумент функции качества данных также является комплексной функцией. Несмотря на то, что аргументы рассматривались в упрощенном виде, они также имеют собственную внутреннюю структуру и способны объединяться и разделяться по принципу смежности и закону дистрибутивности во влиянии на конечный результат.

Описанные выводы являются основой для разработки правил подготовки банка данных для обучения и создания проверочного листа с параметрами оценки банка данных для обучения модели.

Наиболее значимым достижением является демонстрация логически и математически прослеживаемой функциональной связи между исходными данными для обучения модели компьютерной программы и комплексной функцией безопасности полетов. При этом комплексная функция безопасности демонстрируется фрагментировано, так как фактически является многокритериальной комплексной функцией высокого порядка.

Список литературы

1. Bruce Crumley. (2021, December 8). For KLM, Mainblades drone inspection is about to become a vital part of aircraft maintenance. DroneDJ. <https://dronedj.com/2021/12/08/for-klm-mainblades-drone-inspection-is-about-to-become-a-vital-part-of-aircraft-maintenance/>;
2. Mainblades. (2021). Aircraft drone inspections: KLM inspects aircraft with drones – Mainblades renews partnership with Engineering & Maintenance [Video]. YouTube. <https://youtu.be/qwdlXtbmT-0>;
3. Korean Air. (2021, December 16). Korean Air develops world's first aircraft inspection technology using drone swarms. <https://www.koreanair.com/contents/footer/about-us/newsroom/list/211216-korean-air-develops-world-s-first-aircraft-inspection-tec>;
4. Schreiner, M. (2023, March 17). GPT-4 architecture, datasets, costs and more leaked. The Decoder. <https://the-decoder.com/gpt-4-architecture-datasets-costs-and-more-leaked/>;

5. Banh, L., & Strobel, G. (2023). Generative artificial intelligence. Electronic Markets, 33(63). <https://doi.org/10.1007/s12525-023-00680-1>;
6. Roboflow. (2025). Vision AI at the edge. <https://roboflow.com/hardware>;
7. AMD. (2025). AMD documentation hub. <https://www.amd.com/en/search/documentation/hub.html>;
8. Intel. (2025). Intel Core Ultra processors. <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/processors/core-ultra.html>;
9. NVIDIA. (2025). NVIDIA Jetson developer kits. <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-developer-kits>;
10. Ultralytics. (2025). Ultralytics YOLO11. <https://docs.ultralytics.com/ru/models/yolo11/>.

НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІЛЕРДІ ЖӘНЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ОҚЫТУ ДЕРЕКТЕРІНІҢ САПАСЫНЫҢ ҰШУ ҚАУІПСІЗДІГІНЕ ӘСЕРІН ТАЛДАУ

Аңдатпа. Зерттеудің мақсаты — деректер сапасының әсерін және оған ықпал ететін факторларды зерделеу, сондай-ақ нейрондық желі немесе жасанды интеллектті оқыту функциясының аргументтері арасындағы логикалық әрі математикалық байланыстарды формализациялау арқылы олардың ұшу қауіпсіздігімен өзара тәуелділігін көрсету.

Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қарастырылды. Біріншіден, жасанды интеллекттің ұшуға дейінгі тексеру, әуе кемесін жөндеу және техникалық қызмет көрсету үдерістерінде қолданылуының қазіргі жағдайына талдау жасалды. Бұл нейрондық желілер мен жасанды интеллекттің технологиялық интеграция деңгейін айқындау үшін қажет. Екіншіден, жиналған деректер негізінде жасанды интеллектті оқытуға арналған өзекті платформалар анықталды. Бұл оқыту нәтижесіне әсер ететін қосымша техникалық аргументтерді белгілеуге жағдай жасайды. Үшіншіден, негізгі факторлар мен нәтиже арасындағы логика-математикалық байланыстар формализацияланды. Қосымша әсер етуші факторлар да анықталып, құрылымдық түрде сипатталды. Формалды жазу тәсілі ұшу қауіпсіздігіне ықтимал тәуекелдерді бақылауға арналған тізбекті байланыс желісін құруға негіз болады.

Зерттеуде келесі әдістер пайдаланылды. Бақылау — автоматтандырылған оптикалық ақау анықтау технологияларының қолданылу хронологиясы бойынша жиналған ақпаратқа қолданылды. Декомпозиция — кешенді технологиядан ақауларды анықтайтын компьютерлік бағдарламаның функционалдық бөлігін бөліп шығаруға мүмкіндік жасады. Салыстырмалы талдау — әртүрлі нейрондық желілер мен оларды қолдайтын техникалық жүйелердің артықшылықтары мен әлсіз тұстарын айқындады. Математикалық талдау — кешенді функция аргументтерінің әсерін сипаттайтын формулаларды құрылымдауға, сондай-ақ функцияның аддитивті және мультипликативті қасиеттерін бағалауға қолданылды. Диверсиялық және функционалдық талдаулар — факторлар арасындағы өзара байланыстар мен олардың соңғы — ұшу қауіпсіздігінің интегралдық көрсеткішіне ықпалын анықтауға бағытталды.

Нәтижесінде нейрондық желі мен жасанды интеллект аргументтерінен бастап ұшу қауіпсіздігінің кешенді көрсеткішіне дейінгі функционалды-тізбекті байланыстарды сипаттайтын логика-математикалық өрнектер ұсынылды.

Түйін сөздер: жасанды интеллект, нейрондық желілер, ұшу алдындағы тексеру, жасанды интеллект модельдері, салыстырмалы талдау, ұшу қауіпсіздігі.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE QUALITY OF TRAINING DATA OF NEURAL NETWORKS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON FLIGHT SAFETY

Abstract. *The aim of the study is to study the impact of data quality, the factors associated with it, and to formalize the logical and mathematical connections between the arguments of the neural network training function or artificial intelligence to demonstrate the relationship with flight safety.*

To achieve the goal, it is necessary to solve the following tasks. The first is to assess the current state of the issue of the use of artificial intelligence in the procedures of pre-flight inspection, as well as repair and maintenance of the aircraft. This is necessary to determine the level of technological integration of neural networks and artificial intelligence. Secondly, based on the data obtained, it is necessary to determine relevant platforms for training artificial intelligence. This will allow you to identify additional technical arguments that affect the final result of AI training. The third is to formalize the logical and mathematical connection between the influencing factors and the final result. Identify additional influencing factors and also formalize. The formal recording method allows for the construction of a procedurally consistent communication line to monitor safety risks.

The following methods were used to solve the problems. An observation method that has been applied to the information that has been collected in the course of tracking the history of the application of various automated optical fault detection technologies. Decomposition, which made it possible to separate the functional part of the computer program that detects malfunctions from the complex technology. Comparative analysis, which made it possible to determine the strengths and weaknesses of various neural networks and the architectures of technical systems for these neural networks and artificial intelligence. Mathematical analysis, which allows you to formalize the expressions that characterize the influence of the arguments of a complex function and determine the additivity and multiplication of a complex function. Sabotage and functional analyses, which make it possible to determine the relationship between the arguments of complex functions and the final complex safety function.

As a result, expressions were presented that reflect the logical and mathematical connection in a functionally sequential transfer line from the arguments of a neural network and artificial intelligence to a complex indicator of flight safety.

Keywords: *artificial intelligence, neural networks, pre-flight inspection, artificial intelligence models, comparative analysis, flight safety.*

Финансирование: *BR28713125 Разработка и внедрение беспилотных технологий и интеллектуальной робототехнической системы предполетного контроля для повышения безопасности на воздушном транспорте.*

Сведение об авторах

Кошекoв Кайрат Темирбаевич	д. т. н., проректор по научной деятельности, АО «Академия гражданской авиации», г. Алматы, Қазақстан, E-mail: kkoshekov@mail.ru
Алдамжаров Казбек Бахитович	д. т. н., профессор АО «Академия гражданской авиации», г. Алматы, Қазақстан, E-mail: k.aldamzharov@agakaz.kz
Курбанов Якуб Мухсатұлы	студент первого курса докторантуры PhD, Руководитель центра научных исследований и компетенций, АО «Академия Гражданской Авиации», г. Алматы, Қазақстан, E-mail: y.kurbanov@agakaz.kz
Курбанов В.М.	научный сотрудник, АО «Академия Гражданской Авиации», magk462@gmail.com

Авторлар туралы мәлімет

Кошеков Кайрат Темирбаевич	Т.ғ.д., «Азаматтық авиация академиясы» АҚ-ның Ғылыми қызметтер жөніндегі проректоры, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: kkoshekov@mail.ru
Алдамжаров Казбек Бахитович	Т.ғ.д., «Азаматтық авиация академиясы» АҚ-ның профессоры, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: k.aldamzharov@agakaz.kz
Курбанов Якуб Мухсатұлы	PhD докторантураның бірінші курс студенті, Ғылыми зерттеулер және құзыреттер орталығының басшысы,, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: y.kurbanov@agakaz.kz
Курбанов В.М.	«Азаматтық авиация академиясы» АҚ ғылыми қызметкер, magk462@gmail.com

Information about the authors

Kairat Koshekov	Doctor of Engineering Sciences, Vice-Rector for Research, JSC Civil Aviation Academy, Kazakhstan, E-mail: kkoshekov@mail.ru
Kazbek Aldamzharov	Doctor of Technical Sciences, Professor, Academy of Civil Aviation JSC, Almaty, Kazakhstan, E-mail: k.aldamzharov@agakaz.kz
Kurbanov Yakub	first-year PhD student, Head of the Center for Scientific Research and Competencies, Academy of Civil Aviation JSC, Almaty, Kazakhstan, E-mail: y.kurbanov@agakaz.kz
Kurbanov V.	Researcher, Academy of Civil Aviation, magk462@gmail.com



IRSTI 47.49.31

UDC 629.7.05

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_3

I.A. Isgandarov¹, S.Z. Amirbayli¹

¹Azerbaijan Airlines CJSC. National Aviation Academy, Azerbaijan, Baku

*E-mail: sakhavat.amirbeyli@naa.edu.az

RADIOMETRIC–DNN HYBRID MODEL FOR AUTHENTICATING ADS-B SIGNALS

Annotation. *This article explores the perspective opportunities for securely broadcasting the pulse signals emitted by the ADS-B (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast) system, which is currently used in modern aviation systems, against external cyber threats. The objective is to enhance the security level of the existing infrastructure, optimize frequency assessment, and improve traffic management through predictive modeling, thereby enabling more efficient and proactive control. The proposed integration architecture employs deep learning algorithms to analyze aircraft signals and provides functionalities such as signal congestion management, real-time risk forecasting, and proactive prediction of weather and traffic changes. Furthermore, the article presents a performance evaluation of the system operating at 1090 MHz and 978 MHz frequencies and proposes methods for frequency optimization. Research results indicate that incorporating the recognition of device identification via radiometric fingerprints into the ADS-B platform not only enhances security and operational efficiency but also significantly improves the system’s adaptability and responsiveness. This approach opens new avenues for the development of smarter and more predictable future aviation networks.*

Keywords: *ADS-B technology, aviation safety, frequency optimization, real-time data processing, air traffic control.*

Introduction.

Over the past ten years, the aviation industry has witnessed a transformative shift driven by rapid advancements in digital technologies and the integration of artificial intelligence. These innovations have significantly enhanced airspace surveillance, flight safety, and operational efficiency. Among these technologies, ADS-B [9] has emerged as a critical component of modern air traffic management, enabling the real-time broadcasting of an aircraft’s position, speed, and other telemetry data using onboard GPS and transponder systems. However, as global air traffic density continues to increase, traditional ADS-B systems face growing challenges in managing frequency congestion, detecting anomalies, and predicting potential risks in dynamic flight environments. To overcome these limitations, researchers and industry experts are exploring the integration of artificial intelligence and machine learning (ML) models into ADS-B frameworks, thereby unlocking new analytical and predictive capabilities.

This paper introduces a next-generation ADS-B platform enhanced with algorithms designed to improve data processing accuracy, strengthen security outcomes, and support proactive airspace management strategies. The proposed system aims to provide a comprehensive solution for intelligent air traffic monitoring and forecasting by combining ML-based trajectory analysis, deep learning methods for anomaly detection, and frequency optimization techniques to mitigate cyber

threats during pulse broadcasting, utilizing both local computers and other aircraft in real time. The approach enables authentication of the signal source and more accurate detection of potential spoofing and anomalies by learning the RF fingerprint of the transmitter. The passive collection of radiometric data and its integration with the DNN architecture introduce an additional layer of security to the ADS-B system while remaining fully compatible with the existing infrastructure. This represents a new and innovative approach that significantly increases the resilience of the traditional ADS-B mechanism against external interference.

Materials and Research Methods.

ADS-B, or Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, is an advanced surveillance technology that enhances air traffic control and situational awareness for pilots. It works by having aircraft automatically broadcast their GPS position, altitude, and other data to both air traffic control and other equipped aircraft, without requiring pilot or operator input. This information is transmitted using a digital data link, typically on 1090 MHz, and can be received by both ground stations and other aircraft equipped with ADS-B capabilities. ADS-B refers to the Automatic Dependent Surveillance–Broadcast system. This technology functions automatically, meaning that the aircraft continuously transmits data without any intervention from the pilot or operator. The term dependent signifies that the system relies on navigation tools such as GPS or the Flight Management System (FMS) to determine the aircraft's position and velocity. The surveillance aspect reflects the system's ability to monitor and identify aircraft and other objects in three-dimensional space. The transmitted information includes parameters such as the aircraft's position, altitude, velocity, and call sign. These data are accessible to any individual equipped with suitable receiving equipment.

Due to this feature, ADS-B serves as a valuable tool for aircraft operators and air traffic controllers, contributing to safer and more efficient navigation especially within increasingly congested global airspace (Spire global. (n.d)). Let's take a look at the general operating principles of this system (Figure 1).

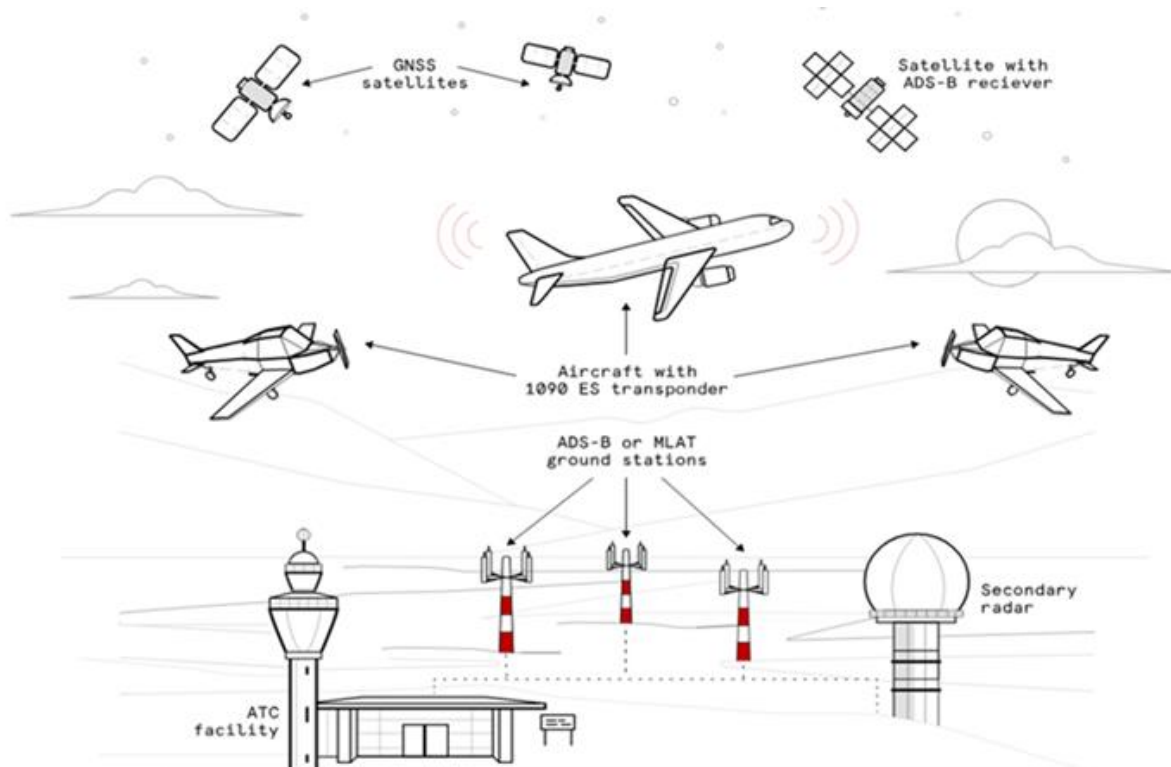


Figure 1 – General operating principles of this system (Spire global. (n.d))

ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast) is an avionic system that enables aircraft to periodically transmit their navigation status without requiring interrogation (Spire global. (n.d)). It has evolved from the ATRCBS (Air Traffic Control Remote Beacon System) – Mode A, Mode C, and Mode S, and is specifically a variation of Mode S. Prior to the introduction of Mode A/C/S, the only method for detecting aircraft was the PSR (Primary Surveillance Radar), which could only provide slant distance and azimuth data [3]. ADS-B “In” enables aircraft to receive TIS-B (traffic data) and FIS-B (weather data), along with direct communication between aircraft (Figure 2).

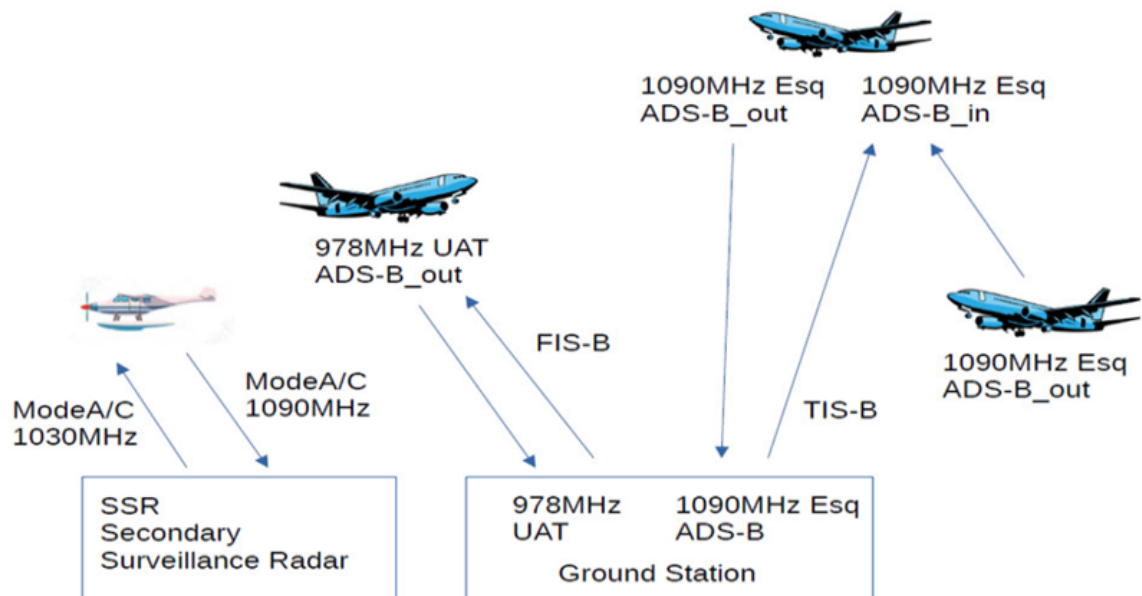


Figure 2 – ADS-B block diagram [2]

Figure 2 illustrates the block diagram of an ADS-B system. Traditional Mode A/C SSR (Secondary Surveillance Radar) systems operate by sending interrogation signals to aircraft on a frequency of 1030 MHz and receiving their responses at 1090 MHz. In contrast, aircraft fitted with ADS-B technology automatically transmit status data at regular intervals over the 1090 MHz frequency, and when appropriately equipped, they are also capable of receiving transmissions on the same frequency [3]. In order to utilize the ADS-B system, aircraft must be equipped with a Mode-S transponder or a beacon featuring ADS-B OUT functionality. To receive data from external sources, the aircraft must also be fitted with ADS-B IN capability. Aircraft equipped with ADS-B autonomously transmit their location data, which is received by both ground stations and satellite systems, ensuring reliable and efficient coverage regardless of environmental constraints [7].

Subsequently, the aircraft continuously transmits this positional data along with identification, flight altitude, velocity, and other relevant parameters. Specialized ADS-B ground stations, designed to receive these signals, collect the transmitted information and relay it to air traffic control authorities, thereby enabling precise tracking of the aircraft [6]. ADS-B data is transmitted every 0.5 seconds via a digital data link operating at a frequency of 1090 MHz, and similar to radar technology, its functionality is constrained by line-of-sight limitations. The ability of a ground station to receive these signals is influenced by the aircraft’s altitude, its distance from the station, and the presence of obstructive terrain. The maximum surveillance range of an individual ground station may exceed 250 nautical miles [4]. Within the airspace surrounding each ground station, coverage typically extends to near ground level.

Results and discussion.

As noted, the Extended Squitter mode is generally a component of the ADS-B (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast) system and operates at a frequency of 1090 MHz. These

signals are transmitted by Mode S transponders and automatically broadcast the aircraft’s position, velocity, altitude, and other flight-related information. This technology is employed for radar-independent tracking and management of air traffic, thereby enhancing both the safety and efficiency of air navigation [2]. The Secondary Surveillance Radar (SSR) system consists of airborne transponders and ground-based interrogators/receivers (Figure 3). Mode A responses transmit the target’s identification (Code 3/A), allowing the use of up to 4096 discrete codes [5]. Mode C responses, on the other hand, convey barometric altitude information.

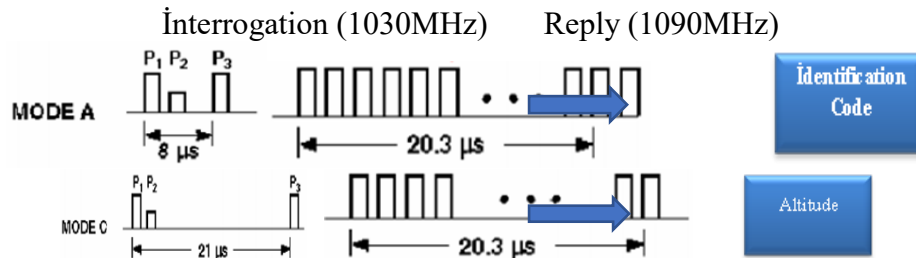


Figure 3 – Interrogation/Reception Pulse Modulation of the Secondary Surveillance Radar System in Mode A/C Operations [5]

- Data transmission rate: 1 Mbit/s
- Modulation method: PPM (Pulse Position Modulation)

Principle of Pulse Position Modulation:

Each bit interval is 1 microsecond in duration. The value of the bit is determined by the position of the pulse within this interval. If the pulse is transmitted in the first half of the interval (the initial 0.5 microseconds), it represents a binary “1”; [5] if the pulse is transmitted in the second half (the latter 0.5 microseconds), it represents a binary “0”.

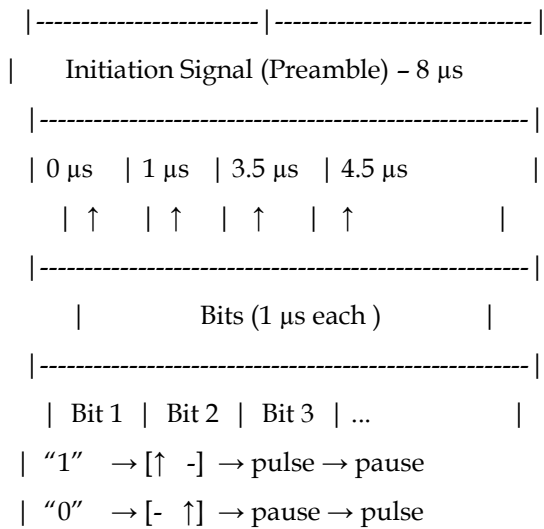


Figure 4 – Bit Encoding Method

The preamble signal serves a critical role in the identification and synchronization of signal packets. These pulses act as a system-level alert, indicating the initiation of a transmission sequence. The encoding of bits is implemented using Pulse Position Modulation (PPM) [1] a technique in which the temporal placement of each pulse encodes the corresponding bit value (Figure 4). These signals are transmitted by aircraft transponders and received by radar systems [8] to facilitate the determination of the aircraft’s spatial position, velocity, and unique identification.

Managing the identity of sending devices is considered one of the most important issues encountered in any network security system [10]. Because the source MAC address displayed on the display can be easily spoofed, network administrators must resort to additional authentication mechanisms to determine the real source of frames. The proposed approach aims to achieve physical-layer identification of the transmitter and relies on the utilization of unique, benign hardware imperfections (radio-frequency — RF artifacts) inherent to each Network Interface Card (NIC) and observable in the emitted signals. These RF artifacts appear in every transmitted pulse and serve as a distinctive “signature” of the corresponding transmitter; thus, by comparing them with a set of pre-recorded signatures, it becomes possible to accurately determine the identity of the transmitter [10].

Channel-specific features, on the other hand, are primarily used to identify the communication channel between the transmitter and the receiver (Figure 5). Consequently, radiometric identification can be regarded as a more specific and specialized form of the RF fingerprinting technique.

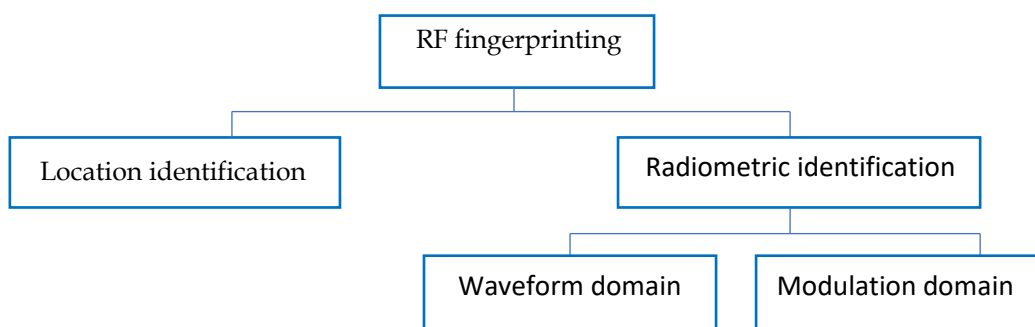


Figure 5 – Structural bases of radiometric identification (Brik V., Banerjee S., 2008)

Radiometric identification is based on the presence of benign hardware imperfections, also known as transmitter impairments, within transmitters. These impairments usually arise during the manufacturing and assembly stages of the analog components in the transmitter’s RF front-end. The term “benign” indicates that these imperfections do not negatively affect communication quality and remain within the quality limits specified by impulse transmission standards. All analog components located in the transmission path of the NIC (Network Interface Card) — from interconnects to antennas — cause certain deviations in the emitted signal compared to the ideal one [10]. The main sources of these deviations are illustrated in Figure 6. In practice, although network interface cards produced using the same manufacturing and assembly processes may appear identical, each one is microscopically unique. While it is theoretically possible to eliminate such hardware imperfections through more precise manufacturing and quality control, this would significantly increase the overall cost of the devices. In fact, many technological standards require different NICs to tolerate a certain range of RF variations in received signals to ensure seamless interoperability. Therefore, the RF artifacts generated by these minor hardware imperfections specific to each transmitter can be effectively used to determine the unique identity of that particular transmitter.

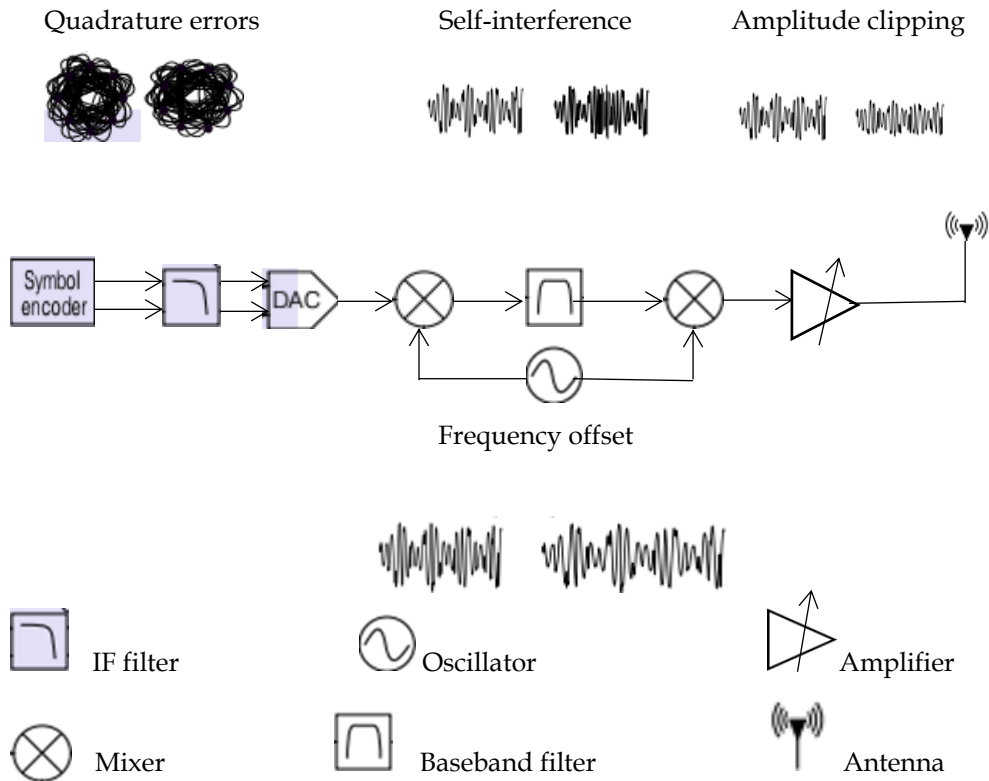


Figure 6 – Frequent transmitter malfunctions and their sources [10]

It should be noted that the foundation of a defined radiometric identification technique lies in the specific artifacts (unique signal characteristics) used to distinguish transmitters from one another. The selection of optimal artifacts for the differentiation process depends on several factors in particular, on the hardware and transmitter design, as well as the underlying communication technology. The concept of radiometric identification itself is not new. Since that time, similar systems have also been implemented by cellular networks, aiming to verify the authenticity of cellular transmitters and to prevent fraud. As such systems possess both commercial and military significance, very limited technical details about their implementation have been publicly disclosed [10]. Nevertheless, further evidence suggests that these systems utilize transient signal characteristics and waveform-level parameters for identification purposes.

The former was specifically developed for aviation services such as ADS-B and requires new hardware, whereas the latter integrates the ADS-B functionality into conventional Mode S transponders. Figure 7 illustrates the ADS-B message structure. Each message consists of an 8 μ s preamble for synchronization and a 56-bit (short) or 112-bit (extended) data block. The first 5 bits of the data block indicate the downlink format (i.e., the message type). The subsequent 3-bit capability field serves as an additional identifier. The 24-bit ICAO address is a unique identifier assigned to each aircraft by the ICAO. The 56-bit extended ADS-B data field conveys surveillance information, including identification, position, velocity, and emergency codes [11].

The final field in the ADS-B message consists of a 24-bit parity check, which allows receivers to confirm the integrity of the preceding data. Within the 56-bit data section, the initial 5 bits indicate the Type Code (TC), defining the nature of the information carried in the remaining bits. Out of the 31 possible Type Codes, particular attention is given to messages conveying airborne position with barometric altitude (TCs 9–18) and airborne velocity data (TC 19). Transmission of ADS-B messages occurs approximately every 0.5 seconds, employing the Pulse Position Modulation (PPM) method. At a data rate of 1 Mbps, the total transmission time for an extended ADS-B message, including the preamble, is 120 microseconds [11].

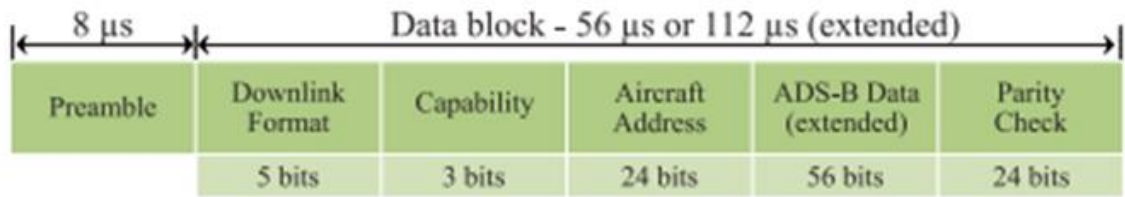


Figure 7 - The schematic representation of the ADS-B message structure demonstrates that each message contains an 8-μs preamble, succeeded by a data field of either 56 μs or 112 μs, according to the specific transmission format [11]

DNNs operate based on the principles of supervised learning, which require a substantial amount of labeled training data for effective performance. A typical DNN architecture consists of input, hidden, and output layers, where each layer comprises a specific number of neurons (nodes). The number of neurons in the input layer corresponds to the number of features in the dataset, while the number of output neurons typically matches the number of classes or labels. The number of hidden layers and the neurons within each layer are considered tunable hyperparameters that define the network's capacity and complexity [11]. In a feed-forward DNN with j hidden neurons, each neuron transforms its input signal, denoted as x_j , into an output state y_j through an activation function. This relationship can be mathematically expressed as:

$$x_j = b_j + \sum_i y_i w_{ij} \quad (1)$$

where b_j represents the bias of the j -th neuron, y_i denotes the output value of the i -th neuron in the preceding layer, and w_{ij} is the weight coefficient (equation 1) connecting neuron i to neuron j . The activation function allows the model to learn nonlinear relationships within data, thereby enhancing the network's ability to recognize complex patterns. ADS-B operates as a wireless communication protocol in which messages are transmitted without inherent security mechanisms such as encryption or authentication, rendering the system susceptible to multiple attack vectors [9]. Key threats to ADS-B include eavesdropping, message tampering, signal jamming, and identity spoofing (Figure 8).

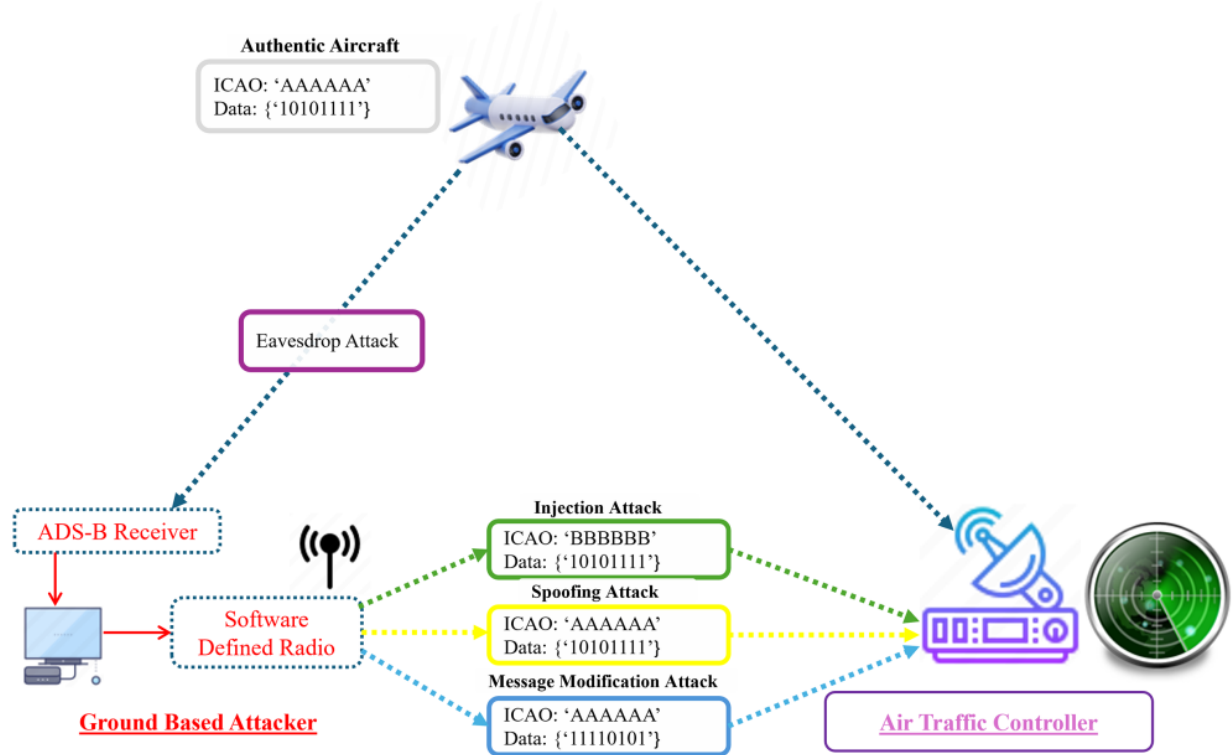


Figure 8 – Conceptual illustration of ADS-B security threats executed by a terrestrial adversary, including signal interception, message manipulation, message injection, and identity spoofing [9]

In contrast to traditional message classification methods, the proposed aircraft classifier does not employ IQ samples or their magnitude values, which directly encode the ICAO address, during the feature extraction stage. This design choice is intended to prevent the classifier from being misled by falsified or manipulated ICAO address information. Instead, the model utilizes phase components that are independent of the claimed ICAO address as the primary discriminative features. Consequently, the phase value of the k-th pair of IQ samples is computed as follows:

$$\phi_k = \tan^{-1}(Q_k/I_k) \tag{2}$$

where I_k and Q_k denote the in-phase (I) and quadrature (Q) components of the k-th IQ sample, respectively (equation 2). From communication theory, it is well established that the phase components encode information related to the transmitter (TX) and receiver (RX) carrier frequency offsets, as well as the Doppler shift. To illustrate this relationship more clearly, the passband ADS-B signal can be represented as follows:

$$x_p(t) = \text{Re}\{\sqrt{2}x(t)c^{j2\pi f_c t}\} \tag{3}$$

This expression (equation 3) illustrates the generation of the real passband signal $x_p(t)$ based on the complex baseband signal $x(t)$.

In this context, $x(t) = x_i(t) + jx_q(t)$ represents the complex baseband signal, while f_c denotes the carrier frequency, which is 1090 MHz in ADS-B systems.

Due to the presence of a carrier frequency offset Δf and a phase offset $\Delta\phi$ the overall form of the signal is modified as follows:

$$\bar{X}_p(t) = \text{Re}\{\sqrt{2}x(t)c^{j2\pi(f_c + \Delta f)t + \Delta\phi}\} = \text{Re}\{\sqrt{2}(x(t)c^{j\phi(t)})c^{j2\pi f_c t}\} \tag{4}$$

Here, $\phi(t)=2\pi\Delta ft+\Delta\phi$ is expressed accordingly. Thus, the rate of change of the phase reflects the carrier frequency offset, which is determined by the combined effect of the transmitter (TX) and receiver (RX) frequency mismatches (equation 4), as well as the Doppler shift, and may also be influenced by the propagation channel.

Consequently, the phase components carry valuable information about the dynamic characteristics of the signal, making them a rich source of features that can be effectively utilized in classification models (Ying X., Mazer J., Bernieriy G., 2019).

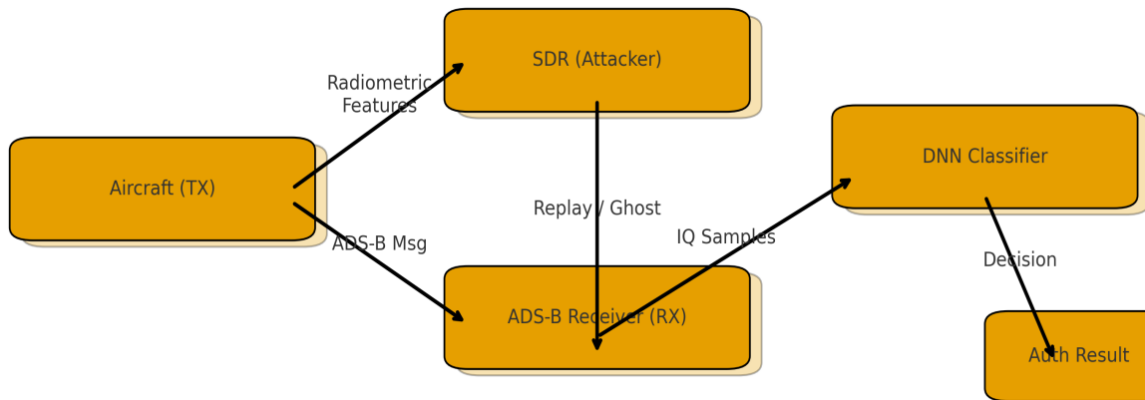


Figure 9 – Radiometric combined with DNN ensures ADS-B message authenticity (Wikipedia, n.d)

This model (Figure 9-10) combines radiometric identification (unique RF traits) with DNN-based learning to ensure ADS-B message authenticity, thereby enhancing cybersecurity in air traffic communication systems.

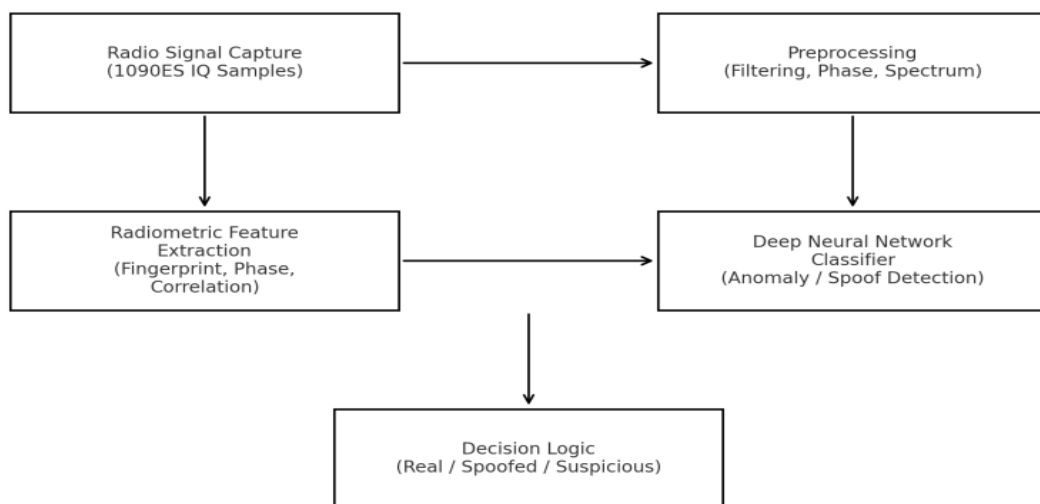


Figure 10 – Radiometric-DNN Hybrid ADS-B Protection Model

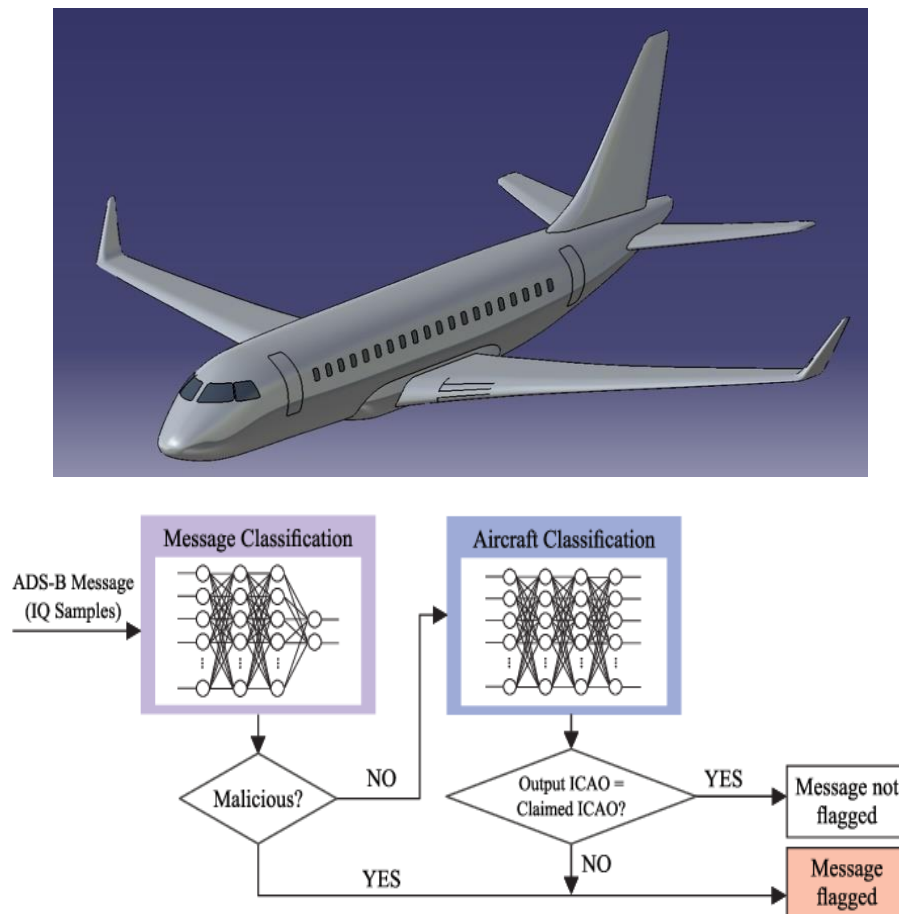


Figure 11 – Illustration of DNN-based detection of ADS-B signal spoofing [11]

The DNN-based approach for detecting ADS-B signal spoofing enables automatic modeling of the multidimensional statistics of signal and trajectory data. The core idea of the method is that the DNN learns normal behavioral patterns characteristic of genuine flights (such as position sequence consistency, speed-distance correlation, altitude variation trends, message interval stability, etc.) and then compares the incoming ADS-B packets against these learned patterns (Figure 11). During spoofing, physically impossible deviations, spatio-temporal inconsistencies, trajectory discontinuities, and signal-level anomalies emerge within these patterns, allowing the DNN to identify such irregularities as anomalies. Consequently, the model accurately detects falsified ADS-B messages based on flight dynamics and signal features, thereby enhancing the reliability of the air traffic surveillance system.

Table 1 – Comparative performance of radiometric fingerprinting and DNN in ADS-B signal authentication (Author’s work)

Metric / Aspect	Radiometric Fingerprint	Deep Neural Network (DNN)	Hybrid (Radiometric+ DNN)
Authentication Accuracy (%)	89.6 ± 1.8	93.4 ± 1.2	98.1 ± 0.7
False Positive Rate (FPR)	3.7 × 10 ²	2.1 × 10 ²	7.9 × 10 ³
False Negative Rate (FNR)	5.8 × 10 ²	4.4 × 10 ²	1.6 × 10 ²

Average Detection Latency (ms)	320 ± 25	180 ± 20	240 ± 22
Model Size (MB)	1.3	54.7	56.2
Training Data Required (samples)	2 × 10 ³	4 × 10 ³	8 × 10 ³
Robustness vs. SNR (down to dB)	8	5	3
Replay Attack Detection (%)	91.2	96.8	99.1
Unique Transmitter Identification Precision (%)	92.7	94.3	98.5
Inference Time (per packet, ms)	65 ± 5	18 ± 3	22 ± 4
Explainability (1–5)	5	3	4
Computational Cost (relative units)	1.0×	3.7×	2.4×
Overall Security Gain (%)	-	-	+22.3

This table compares three different approaches for ADS-B signal authentication: Radiometric Fingerprinting, Deep Neural Network (DNN), and the Hybrid Radiometric–DNN model. The results indicate that the hybrid model achieves the highest accuracy (98.1 %) while maintaining the lowest false positive and false negative rates (0.79×10^{-2} and 1.6×10^{-2} , respectively). Radiometric fingerprinting offers the highest explainability (5/5) with minimal computational cost, whereas the DNN model provides faster signal detection but at the expense of larger model size and higher computational requirements. The hybrid model optimizes both accuracy and security gains (+22.3 %), and it more effectively detects replay attacks and identifies unique transmitters. Additionally, the table presents each method’s training data requirements, detection latency, and robustness under varying SNR conditions.

Conclusion.

In this article, we present a tested conceptual and methodological framework that combines deep neural networks (DNNs) with radiometric fingerprinting and frequency characteristics to detect and mitigate cyber-attacks on ADS-B systems, including threats originating from ground stations and other aircraft. Radiometric fingerprints capture unique patterns arising from the physical, electromagnetic, and frequency properties of transmitter hardware, enabling identification independently of message content, protocol compliance, or frequency variations. DNNs provide a powerful tool to learn these high-dimensional and complex patterns: they can accurately distinguish spoofed or replayed messages by learning both observed signal variations and frequency offsets, while maintaining generalization under varying signal-to-noise ratios, channel conditions, flight dynamics, and frequency fluctuations. The proposed methodology enhances both early attack detection and system resilience in practical deployment. A two-tier verification process based on radiometric and frequency features—protocol and frequency compliance checking at the first level, followed by transmitter fingerprint confirmation at the second level—reduces false positives and false negatives, thereby adding robust defense layers to air traffic security. Future research should focus on expanding datasets across diverse hardware, optimizing workload distribution between edge and cloud computing, and enhancing DNN interpretability and robustness through uncertainty estimation and adversarial defense mechanisms. A DNN-based approach reinforced with radiometric and frequency fingerprinting offers a promising and practically implementable solution for defending ADS-B infrastructure against cyber threats. It complements existing protocol and frequency checks to improve detection sensitivity, while laying the foundation for adaptive and scalable security mechanisms. Reliable

operation requires ongoing experimental validation, regulatory compliance, and careful management of technical and ethical considerations.

References

1. Carey, B. (2014). India Completes ADS-B Ground Network Installation. <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2014-06-13/india-completes-ads-b-ground-network-installation>
2. ComSoft ComSoft. (2009, March). Further ADS-B installations in Abu Dhabi through COMSOFT. Retrieved May 13, 2010. <https://www.atc-network.com/atc-news/further-ads-b-installations-in-abu-dhabi-through-comsoft>
3. Clark J. (2021). E-Books on Telecommunications, Navigation & Electronics.
4. Airservices Australia. (2010). ADS-B Flight Operations Information Package V4.0. https://www.airservicesaustralia.com/wpcontent/uploads/UAP_Flight_Ops_Info_Package_V4.0.pdf
5. European Organisation for the Safety of Air Navigation. (2019). ADS-B for Dummies 1090MHz Extended Squitter. [https://www.sigidwiki.com/images/1/15/ADS-B for dummies](https://www.sigidwiki.com/images/1/15/ADS-B_for_dummies)
6. Mozdzanowska, Aleksandra, Weibel, R., Lester, E., Hansman, R., Weigel, A. & Marais, K. (18–20 September 2007). Dynamics of Air Transportation System Transition and Implications for ADS-B Equipage. Belfast, Northern Ireland: AIAA. <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/39093/ATIO-ADS-B-transition-2007.pdf?sequence=1>
7. Spire global. (n.d). ADS-B systems and technologies in aviation, more internet resource <https://spire.com/wiki/how-does-ads-b-work>
8. Tong Z. (6 January 2024). China targets devices it says are used to send flight data to foreign entities. South China Morning Post. [http://China targets devices it says are used to send flight data to foreign entities](http://China%20targets%20devices%20it%20says%20are%20used%20to%20send%20flight%20data%20to%20foreign%20entities)
9. Ahmed, W., Masood, A., Manzoor, J., & Akleyek, S. (2025, June 9). Automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) anomalous messages and attack type detection: deep learning-based architecture. PeerJ Computer Science. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2886>
10. Brik, V., Banerjee, S., Gruteser, M. & Oh, S. (2008). Wireless device identification. Proceedings of the 14th ACM international on Mobile computing and networking, 116 – 127. <https://wings.cs.wisc.edu/publications/wireless-device-identification-with-radiometric-signatures/>
11. Ying, X., Mazer, J., Bernieriy, G., Contiy, M., Bushnell, L. & Poovendran R. (2019). Detecting ADS-B Spoofing. 2019. IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS), 187-195 <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.09969>

АДС-В СИГНАЛДАРЫН АУТЕНТИФИКАЦИЯЛАУҒА АРНАЛҒАН РАДИОМЕТРИЯЛЫҚ–DNN ГИБРИДТІ МОДЕЛІ

Аңдатпа. Бұл мақалада қазіргі заманғы авиация жүйелерінде қолданылатын АДС-В (Автоматты тәуелді бақылау-тарату) жүйесі шығаратын импульстік сигналдарды сыртқы киберқауіптерге қарсы қауіпсіз таратудың перспективалық мүмкіндіктері қарастырылады. Мақсат - қолданыстағы инфрақұрылымның қауіпсіздік деңгейін арттыру, жиілікті бағалауды оңтайландыру және болжамды модельдеу арқылы трафикті басқаруды жақсарту, осылайша тиімдірек және белсенді бақылауды қамтамасыз ету. Ұсынылған интеграция архитектурасы әуе кемелерінің сигналдарын талдау үшін терең оқыту алгоритмдерін пайдаланады және сигналдың кептелісін басқару, нақты уақыт режимінде тәуекелдерді болжау және ауа райы мен трафиктің өзгеруін белсенді түрде болжау сияқты функцияларды қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, мақалада 1090 МГц және 978 МГц жиіліктерінде жұмыс істейтін жүйенің өнімділігін

бағалау және жиілікті оңтайландыру әдістері ұсынылады. Зерттеу нәтижелері ADS-B платформасына радиометриялық саусақ іздері арқылы құрылғыны сәйкестендіруді таңуды енгізу қауіпсіздік пен пайдалану тиімділігін арттырып қана қоймай, сонымен қатар жүйенің бейімделуі мен жауап беру қабілетін айтарлықтай жақсартатынын көрсетеді. Бұл тәсіл ақылды және болжамды болашақ авиация желілерін дамыту үшін жаңа жолдар ашады.

Түйін сөздер: ADS-B технологиясы, авиациялық қауіпсіздік, жиілікті оңтайландыру, нақты уақыт режимінде деректерді өңдеу, әуе қозғалысын басқару.

ГИБРИДНАЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКИ-DNN-МОДЕЛЬ ДЛЯ АУТЕНТИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ ADS-B

Аннотация. В данной статье рассматриваются перспективные возможности безопасной трансляции импульсных сигналов, излучаемых системой ADS-B (автоматическое зависимое наблюдение – вещание), которая в настоящее время используется в современных авиационных системах, для защиты от внешних киберугроз. Целью является повышение уровня безопасности существующей инфраструктуры, оптимизация оценки частот и улучшение управления дорожным движением посредством предиктивного моделирования, что обеспечивает более эффективное и проактивное управление. Предлагаемая архитектура интеграции использует алгоритмы глубокого обучения для анализа сигналов воздушных судов и обеспечивает такие функции, как управление перегрузкой сигналов, прогнозирование рисков в реальном времени и проактивное прогнозирование изменений погоды и дорожного движения. Кроме того, в статье представлена оценка производительности системы, работающей на частотах 1090 МГц и 978 МГц, и предлагаются методы оптимизации частот. Результаты исследований показывают, что включение распознавания идентификационных данных устройств по радиометрическим отпечаткам в платформу ADS-B не только повышает безопасность и эксплуатационную эффективность, но и значительно улучшает адаптивность и скорость реагирования системы. Такой подход открывает новые возможности для разработки более интеллектуальных и предсказуемых будущих авиационных сетей.

Ключевые слова: Технология ADS-B, безопасность полетов, оптимизация частоты, обработка данных в реальном времени, управление воздушным движением.

Сведение об авторах

Ислам Искендеров	Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Национальной авиационной академии, Азербайджан, Баку E-mail: iisgandarov@naa.edu.az
Сахават Амирбейли	Магистр, главный лаборант и преподаватель кафедры Национальной авиационной академии, Азербайджан, Баку Электронная почта: sakhavat.amirbeyli@naa.edu.az

Авторлар туралы мәлімет

Ислам Исгандаров	PhD, профессор, Ұлттық авиация академиясының кафедра меңгерушісі, Әзербайжан, Баку E-mail: iisgandarov@naa.edu.az
Сахават Амирбейли	Ұлттық авиация академиясының магистрі, кафедраның бас лаборанты және оқытушысы, Әзербайжан, Баку Электронная почта: sakhavat.amirbeyli@naa.edu.az

Information about the authors

Islam Isgandarov	PhD, Professor, Head of Department at the National Aviation Academy, Azerbaijan, Baku E-mail: iisgandarov@naa.edu.az
Sakhavat Amirbayli	Master, Senior laboratory assistant and Lecturer of Department at the National Aviation Academy, Azerbaijan, Baku E-mail: sakhavat.amirbeyli@naa.edu.az



ӘОЖ 656

ГТАХА 73.29.61

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_4

М.М. Нуржаубаев^{1*}, А.С. Избаирова¹, С. Болатқызы¹, Л.Х. Сарсенбаева²,
В.Ф. Лукиных³

¹Сатпаев Университеті, Алматы, Қазақстан

²Батыс Қазақстан инновациялық-технологиялық университеті, Орал, Қазақстан

³Красноярск мемлекеттік аграрлық университеті, Красноярск, Ресей Федерациясы

*E-mail: make1370@mail.ru

ТЕМІРЖОЛ СТАНЦИЯЛАРЫНДА ЖОЛДАР МЕН ВАГОНДАРДЫҢ МАРШРУТТАРЫН ТИІМДІ БӨЛУ

Аңдатпа. Бұл мақалада вагон ағындарын өңдеу тиімділігін арттыру мақсатында өнеркәсіптік теміржол станцияларында жолдарды бөлуді оңтайландыру мәселелері қарастырылады. Тақырыптың өзектілігі шектеулі жол ресурстарын ұтымды пайдалану, станциялардың өткізу қабілеті мен өңдеу қабілетін арттыру және пайдалану шығындарын азайту қажеттілігіне байланысты. Негізгі назар аударылатын бағыт бойынша вагон ағындарын құрастыру және өңдеу ерекшеліктерін, қозғалыс кестесін, өңдеу тәртібін және шектеулі жол қорының ерекшеліктерін ескеретін модельдер мен оңтайландыру әдістерін әзірлеуге бағытталған. Ұсынылған шешімдер математикалық модельдеу, графиктер теориясы, сызықтық және дискретті бағдарламалау әдістерін қолдануға негізделген. Нәтижелер станцияларды басқарудың автоматтандырылған жүйелерін әзірлеу үшін пайдаланылуы мүмкін, бұл вагондарды жолдар бойымен жоспарлауды және жедел бөлуді айтарлықтай жақсартады, жылжымалы құрамның тұрып қалуын қысқартады және жүктерді өңдеуді тездетеді.

Түйін сөздер: теміржол көлігі, өнеркәсіптік теміржол станциясы, қосалқы жол, маневрлік операциялар, вагондарды жинақтау, вагон маршруттары.

Кіріспе. Өнеркәсіптік кәсіпорындардың теміржол көлігін пайдаланудың заманауи шарттары маневрлік жұмыс көлемінің күрт өсуімен сипатталады. Соңғы зерттеулер [1] көрсеткендей, дәстүрлі тәсілдер қазіргі динамикалық жүк ағындарын тиімді басқаруға жеткілікті емес. Посткеңестік елдерде теміржол инфрақұрылымының құрылысы негізінен Кеңес дәуірінде жоспарланған экономика жағдайында жүзеге асырылды. Олардың кірме жолдарының орналасуы жүктердің шағын ассортиментімен жұмыс істеуге және бір оператордың әмбебап вагондарында – инвентарлық теміржол вагондарында тасымалдауды жүзеге асыруға есептелген [2]. Қазіргі уақытта мамандандырылған вагондарда тасымалданатын жүктердің үлесі едәуір өсті. Сонымен қатар, вагондар паркі көптеген иелер арасында бөлінген, тіпті вагондар да бір-бірін алмастырмайды. Осылайша, жұмыс көлемінің төмендеуіне қарамастан, өнеркәсіптік кәсіпорындарда маневрлік өткелдер мен пойыздар құрамын жинақтау үшін жолдардың созылмалы жетіспеушілігі байқалады, бұл вагондардың қозғалыс бағыттарының ұлғаюының нәтижесі болып табылады. Бұл мәселе әсіресе тау-кен және металлургия кәсіпорындары үшін [3], сондай-ақ жүк тиеу-түсіру операцияларына қызмет көрсету үшін өзінің теміржол инфрақұрылымын пайдалануға бағытталған теңіз порттары үшін өте маңызды. Осыған байланысты жолдардың өткізу

қабілетінің тапшылығы жағдайында теміржол көлігінің жұмысын ұйымдастыру мәселесі өзекті болып табылады.

Әдебиетке шолу. Теміржол көлігі-күрделі жүйе. Бұл жағдайда бірдей операцияларды әртүрлі техникалық құралдармен жасауға болады. Бұл шарттарда жұмыстың минималды құнына немесе бөлінген жұмыстың максималды көлеміне қол жеткізу үшін техникалық құралдарды ұтымды бөлу бойынша әртүрлі міндеттер туындайды [4]. Магистральдық көлікте желі бойынша сұрыптау жұмыстарын бөлу міндеті пойыздар құрамын құрастыру жоспарын әзірлеу шеңберінде шешіледі. Жалпыға ортақ пайдаланылатын теміржолдармен жүру үрдісінде [5] пойыздардың қозғалыс көлемі бірнеше сұрыптау станциялары арқылы өтеді. Сұрыптау станцияларында қол жетімді жолдар саны мәселені шешуге шектеу ретінде қарастырылады. Егер Сұрыптау станциясының жұмысы үшін жолдар жеткіліксіз болса, бұл жұмыс басқа сұрыптау станциясына ауыстырылады. Магистральдық теміржол желісінің үлкен көлеміне байланысты сұрыптау жолдарын мамандандыру міндеттерін құрастыру жоспарын әзірлеу кезінде олар әр станция үшін бөлек шешіледі. Өнеркәсіптік кәсіпорындардағы станциялардың аздығын ескере отырып, магистральдық көлікте қолданылатын әдістердің өнеркәсіптік көлікте қолданылуы шектеулі.

Магистральдық теміржол көлігімен салыстырғанда өнеркәсіптік кәсіпорындардың көлік жүйелері айтарлықтай аз. Сондықтан маневрлік жұмысты ұтымды ұйымдастыру міндеті бірнеше станциялар мен жүк фронттарымен шектеледі.

Белосевич И және Ивич М. [6], Гестрелиус С. және т.б. [7], Чжоу В. және т. б. [8] мақалалар жолдары шектеулі сұрыптау станцияларында пойыздарды бөлу, жинақтау және орналастыру үрдісін ұйымдастырумен байланысты. Соңғы жылдары бұл салада бірқатар инновациялық тәсілдер пайда болды: Козаченко Д. және т.б. [9], Сивицкий Д. және т. б. [11] мақалалар топтық пойыздарды құру міндеттеріне арналған. Қаралған мақалаларда жолдардың өткізу қабілетінің тапшылығы жағдайында топтық пойыздарды құрастыру мәселесі тек бір станция шегінде шешіледі. Бұл ретте бірнеше станциядан өту кезінде вагондарды сұрыптауды оңтайландыру мәселесі қарастырылмайды.

Порт торабындағы жіктеу жұмыстарын бөлу мәселесі Бородина Е. және басқалардың жұмысында қарастырылған. [12]. Бұл жұмыста түйіндегі жіктеу жұмыстарының міндеті пайдалану шығындарының минимумына қол жеткізу шарты негізінде рәсімделеді; дегенмен, бұл мәселені шешудің әдістемесі келтірілмеген. Бородина Е. және басқалардың жұмысында жұмысында [12] жұмысты екі станция арасында бөлу міндетін қарастырады: металлургиялық кәсіпорынның өндірістік сұрыптау станциясы және магистральдық сұрыптау станциясы арасындағы. Айта кету керек, бұл жұмыста бөлу мәселесін шешкен кезде жалпы міндет дәйекті түрде шешілетін ішкі міндеттерге бөлінді. Осыған байланысты алынған шешім, әдетте, қатаң оңтайлы емес.

Жүргізілген талдау маневрлік жұмыстарды орындау үшін теміржол инфрақұрылымын оңтайлы пайдалану мәселесі өзекті екенін және одан әрі зерттеуді қажет ететінін көрсетеді. Бұл мәселені шешу әртүрлі технологиялық операцияларды орындауға кететін уақытты бағалау үшін теміржолды пайдалану теориясының әдістерін, сондай-ақ оңтайлы шешімдерді табу үшін операцияларды зерттеу әдістерін қолданумен байланысты [14].

Маневрлік операцияларды орындауға кететін уақыт шығындарын бағалау үшін қазіргі уақытта негізінен имитациялық және статистикалық әдістер қолданылады. Бірінші тәсіл қозғалыс теңдеулерін шешуге және маневр жасау үрдісінде болатын операцияларды модельдеуге негізделген. Бұл әдіс маневрлік операциялардың ұзақтығын жоғары дәлдікпен бағалауға мүмкіндік береді.

Материалдар мен зерттеу әдістері.

Мақсаты. Вагондар топтары үшін жинақтау маршруттарын жекелеген бағыттар арасында бөлу әдісін жетілдіру.

Әдістері. Зерттеулер жеке бағыттар үшін вагондарды жинақтау маршруттарын мамандандырудың тиімділігін бағалау үшін темір жолды пайдалану теориясы мен

имитациялық модельдеу әдістерін, сондай-ақ вагондардың баратын орындары арасындағы маршруттардың оңтайлы таралуын табу үшін динамикалық бағдарламалау әдісін қолдану арқылы жүргізілді. Бұл тәсіл халықаралық тәжірибеде қолданылатын заманауи әдістермен [14] салыстырмалы талдау жүргізуге мүмкіндік береді.

Негізгі материалды ұсыну. Ірі кәсіпорындардың теміржол инфрақұрылымына жалпы пайдаланудағы темір жол желісінен келетін және оған кететін вагон тасымалының көлемін реттейтін өнеркәсіптік аралық немесе жазық аумақтар, сондай-ақ әртүрлі цехтарға қызмет көрсететін жүк станциялары жатады. Пойыз қозғалысы әдетте металлургиялық зауыт станциялары арасында ұйымдастырылады. Сұрыптау жолының нөмірін анықтау тәртібі ҚНЖЕ 2.05.07-91 «Өнеркәсіптік көлік» белгіленген. Осы нормативтік құжатқа сәйкес өнеркәсіптік станциялар мен ірі жүк фронттарында вагондарды жинақтауға арналған мамандандырылған сұрыптау жолдарының саны күніне бір жолдан 150 вагонды шығару шартымен белгіленеді. Пойыздарды шикізат пен отынның сорттары, вагондарды өңдеу түрлері, сусымалы жүктерді тиеуге жылжымалы құрамның техникалық жарамдылығы және т.б. бойынша бөлуге арналған вагондарды мамандандырылған сұрыптау жолдарынан шығару бір жолдан тәулігіне 100-110 вагон есебімен жүргізіледі. Вагондарды мамандандырылмаған сұрыптау жолдардан шығару жинақталған бағыттардың санына және қайта ұйымдастырылатын пойыздардағы вагондардың санына байланысты тәулігіне 30-65 вагонды құрайды.

Вагондарды жинақтау үшін тәуліктік өнімділігі 200 вагоннан аспайтын бір жол бөлінген. Мамандандырылған және мамандандырылмаған жолдарда жинақталған вагондардың күнделікті айырмашылық тағайындалған орындары арасында жинақтау маршруттарын ұтымды бөлу мәселесін тұжырымдауға мүмкіндік береді.

Жобалау тапсырмаларына қарағанда, қажетті жолдар саны анықталған кезде жұмыстың белгілі көлемдерін орындау үшін, пайдалану тапсырмаларда белгіленген жұмыс көлемдерін орындау үшін қолданыстағы жол схемасының ең ұтымды нұсқасын табу қажет.

Өнеркәсіптік кәсіпорындардың жұмысына жасалған талдаулар өңдеу алаңдарында қалыптасқан бағыттардың саны негізінен жобалық шарттарға сәйкес келетінін көрсетеді. Сонымен бірге жүк станцияларында вагондардың бағытталу санының артуына байланысты вагондар қозғалысының көлемін қосымша өңдеу қажеттілігі туындайды.

Пойыздарды тағайындау, құрастыру және маневрлік жұмыстар өнеркәсіптік станциялардың негізгі қызметі болып табылады. Бұл маневрлік жұмыстарды орындау үшін вагондарды итеру арқылы сұрыптауға арналған сұрыптау алаңдары мен арнайы профильді бағыттама бұрмалары салынады.

Пойыздарды тарқатуға және маневрлік ауыстыруларды жүргізуге арналған маневрлік жұмыстарға кететін уақыт вагондарды жинақтау үшін бөлінген жолдар санына тәуелді. Бұл вагондардың әртүрлі бағыттары арасында қолжетімді маршруттарды бөлу мәселесін тудырады. Бұл мәселе ірі өнеркәсіптік зауыттың қапталында жүк вагондарын өңдеу үрдісінің бір бөлігін қарастырады, ол өнеркәсіптік өңдеу алаңына келетін пойыздарды тарқатуды, пойыздарды немесе маневрлік тасымалдауларды құруды, пойыздарды бұзуды немесе жүк алаңдарында маневрлік тасымалдауларды қамтиды. Сұрыптау алаңының жолдарын мамандандырған кезде әрбір жүк алаңына бекітілген вагондарды жинақтау үшін қанша жол бөлінгенін және оның мекен-жайы бойынша пойыздардың қандай түрін (бір немесе топтық) құрайтынын анықтау қажет. Маневрлік жұмыстарды қайта бөлу бір кәсіпорынның ішінде болатынын ескере отырып, қабылданған шешімдердің тиімділігін бағалау үшін табиғи көрсеткішті – маневрлік жұмысқа жұмсалған ең аз уақытты пайдалануға болады. Бұл мәселедегі шектеулер тізгіндеу алаңында вагондарды жинақтау үшін бөлінген жолдардың жалпы саны, сондай-ақ тізгіндеу алаңы мен жүк алаңының өткізу қабілеті болып табылады.

Есептің математикалық тұжырымы келесідей. Жүк станциясының шартты нөмірі i болсын $i = k, l$ (мұнда k – жүк станцияларының саны). Сұрыптау станция мен i -ші жүк

станциясы арасында жүретін вагондардың қозғалыс көлемінің параметрлері d_i станциясының мекенжайына келетін вагондардың межелі жерімен, N_i вагон қозғалысының тәуліктік көлемімен және пойыздағы вагондар санымен m_i сипатталады. x_i айнымалысы i -ші жүк станциясының мекен-жайы бойынша вагондарды жинақтау үшін сұрыптау алаңында бөлінген жолдар санын белгілесін. x_i айнымалысы $0 << x_i \leq W$ болатын бүтін мәндерді қабылдай алады (мұндағы W - жинақтау алаңында вагондарды жинақтау үшін бөлінген жолдар саны). b_i логикалық айнымалысы арқылы i -ші жүк станциясының мекен-жайындағы сұрыптау алаңында пойыздар тобының құрастыру белгісін белгілейік. Бұл жағдайда егер $b_i = 0$ болса, онда бір топтың пойыздары вагондар кездейсоқ ретпен орналасқан i -ші жүк станциясына жіберіледі, ал егер $b_i = 1$ болса, онда топтық пойыздар вагондар кездейсоқ ретпен орналасқан i -ші жүк станциясына жіберіледі. баратын жерлеріне қарай топтарға бөлінеді.

i -жүк станциясының орналасуы бойынша вагон қозғалысының көлемдері бойынша маневрлік жұмыстарға жұмсалатын уақыт шығындарына S_i сұрыптау станцияда болған уақыт және F_i жүк станциясында болған уақыт жатады.

$$T_i = S_i + F_i, \quad T_i = f(N_i, m_i, d_i, x_i, b_i) \quad (1)$$

S_i және F_i мәндері функционалды түрде пойыздар қозғалыс көлемінің параметрлеріне және x_i және b_i мәндеріне тәуелді.

$$T_i = f_S(N_i, m_i, d_i, x_i, b_i) + F_i, \quad (2)$$

$$T_i = f_S(N_i, m_i, d_i, x_i, b_i) + f_F(N_i, m_i, d_i, b_i). \quad (3)$$

D_S сұрыптау станциясы арқылы маневрлік құраммен алынған уақыт ұзақтығын және D_i жүк станциясы арқылы маневрлік құраммен алынған уақыт ұзақтығын белгілейік. Жалпы жағдайда, вагондар топтарын жинақтау үшін өнеркәсіптік сұрыптау станцияның жолдарын жеке тағайындаулар арасында бөлу мәселесі бағытталған функциясының мәнін минимумға келтіретін N_i, m_i, d_i ($i = 1, k$) берілген мәндері үшін x_i және b_i айнымалыларының мәндерін табудан тұрады.

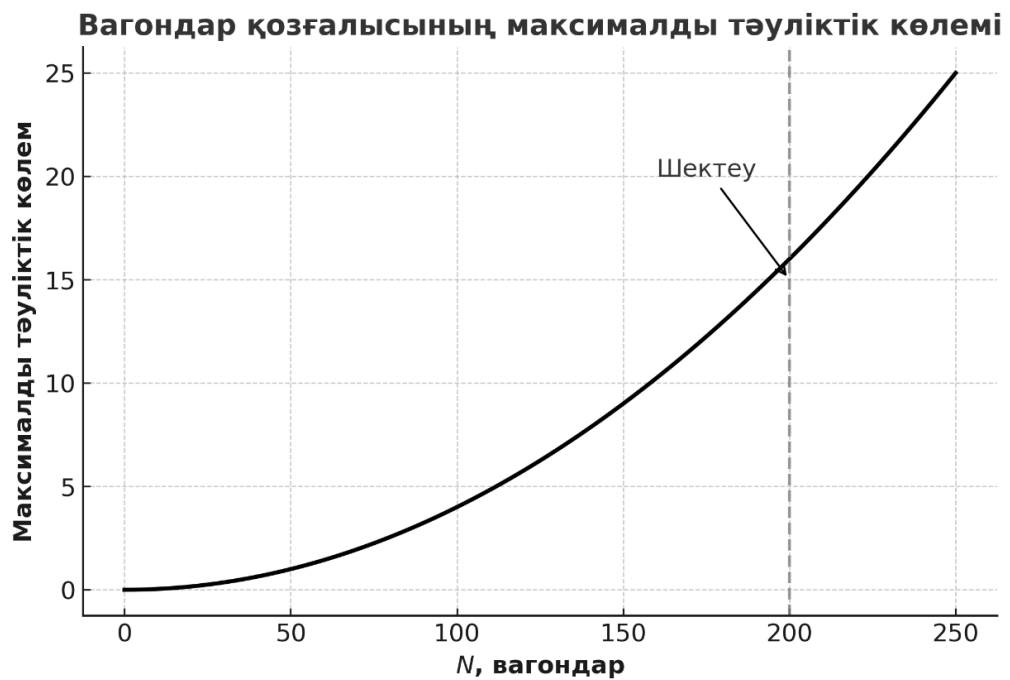
$$\min \sum_{i=1}^k T_i(x_i, b_i), \quad (4)$$

шектеулерде

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^k f_S(x_i, b_i) \leq D_S \\ f_F(b_i) \leq D_i, \quad i = \{1, \dots, k\}, \\ 0 < x_i \leq W, \quad i = \{1, \dots, k\}, \\ \sum_{i=1}^k x_i \leq W \end{array} \right. \quad (5)$$

Функциялардың (1 және 2) параметрлерін анықтау үшін темір жолды пайдалану теориясының әдістері қолданылды. Белгілі бір бағыттарға арналған вагондарды жинақтау үшін сұрыптау станцияда бөлінген жолдар саны пойыздарды таратуға да, құрастыруға да жұмсалатын уақытқа әсер етеді. Пойыздарды немесе маневрлерді тарату кезінде олардың

вагондары жинақтау жолдарына түседі. Пойыздың жинақталуын аяқтағаннан кейін бұл пойыз технологиялық операциялар бойынша жинақтау жолында біраз уақыт бос тұрып, оларды күтеді. Белгілі бір бағыттағы пойызды жинақтау үшін бір жол бөлінген болса, онда жинақтау жолы толған кезде келген вагондар сұрыптау жолына жіберіліп, қайта сұрыпталады. Қайта сұрыптауды болдырмау үшін екі немесе одан да көп жолдар болса, жинақтау үрдісі басқа жинақтау жолында басталады. Жинақтау жолдарға келетін вагондардың тәуліктік саны мен сұрыптау маршрутына жіберілген вагондар саны арасындағы байланыстың пішінін бағалау үшін имитациялық модельмен бірқатар есептеу тәжірибелері жүргізілді. Эксперименттерді жүргізу кезінде жинақтау жолын вагондармен толтыру модельденді. Вагондар топ-топ болып келді. Жинақтау жолдары толған кезде, артық вагондар қайта сұрыптау үшін сұрыптау жолына жіберілді. Есептеу эксперименттерінің нәтижелерінің мысалы 1-суретте келтірілген.



Сурет - 1 Жинақтау жолына келген вагондар саны мен сұрыптау жолдарына жіберілген вагондар саны арасындағы қатынас

Станциялық имитациялық модельді қолдану арқылы орындалған есептеу эксперименттерінің нәтижелерін статистикалық өңдеу негізінде $n_{rs,i}$ сұрыптау жолына жіберілген вагондар санының өңдеуге келген i -ші тағайындалған вагондардың тәуліктік санына тәуелділігі квадраттық сипатта болатыны анықталды [14].

$$n_{rs,i} = (a_0 + a_1 N_i + a_2 N_i^2) \cdot \delta(x_i - 1) \quad (6)$$

$$\delta(x_i - 1) \begin{cases} 1 & x_i = 1, \\ 0 & x_i > 1. \end{cases} \quad (7)$$

мұндағы a_0 , a_1 , a_2 көпмүшелік регрессия коэффициенттері.

Вагондарды қайта сұрыптау үшін маневрлік жұмыстарға кеткен уақытты келесі ұғымнан анықтауға болады:

$$T_{rs,i} = t_{rs} \cdot (a_0 + a_1 N_i + a_2 N_i^2) \cdot \delta(x_i - 1), \quad (8)$$

мұндағы t_{rs} – бір вагонды қайта сұрыптауға кеткен орташа уақыт, мин.

Өнеркәсіптік сұрыптау станцияда пойызды құрастыру немесе маневрлік ауыстыру операциялары вагондардың жекелеген топтарын тарту арқылы қосуды, сондай-ақ топтық пойыздар құрамында вагондарды ретке келтіруді қамтиды. Маневрлік құрамдарды қайта тартуға кететін уақыт ретінде келесідей анықталады:

$$m_c = \frac{T_{pul}}{0.08}, \quad (9)$$

$$T_{pul} = \frac{8}{100} m_c = \frac{2}{25} m_c$$

мұндағы m_c – пойыздағы вагондар саны.

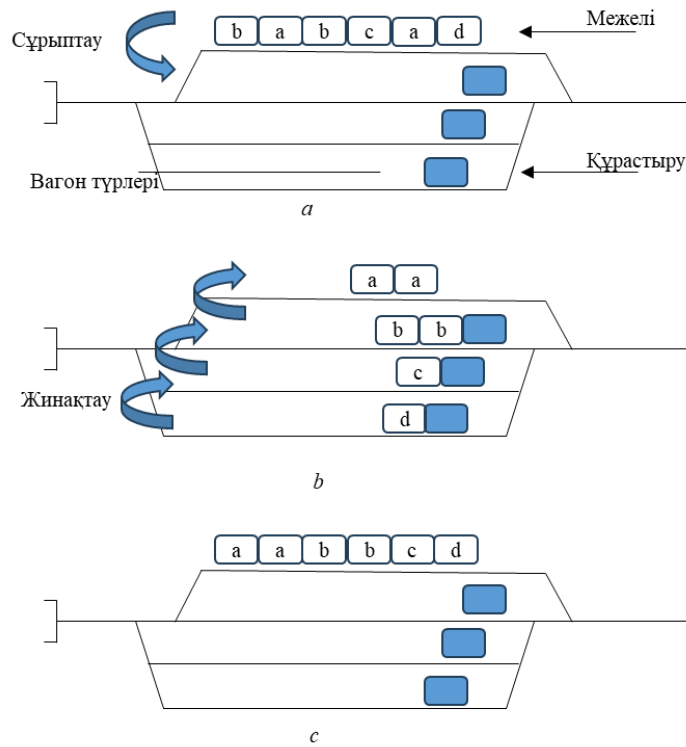
T_{pul} мәні тек вагондардың жалпы санына байланысты екенін ескерсек, ол жолдың мамандануы өзгерген кезде өзгермейді және мақсаттық функциядан (3) және шектеулер жүйесіндегі (4) P_5 мәнінен алып тастауға болады.

Пойыздағы вагондарды орналастыруға кететін уақыт пойыздың жинақталуына бөлінген жолдар санына байланысты. Бір топтық пойыздар жөнелтілген кезде вагондар оларға қойылмайды. Белгілі бір бағыттағы вагондарды жинақтау үшін бір жол бөлінген болса, онда вагондарды топтарға іріктеу 2а-суретте көрсетілгендей, олардың бағытына қарай жолдың соңында вагондарды сұрыптауды қамтиды және олардың кейінгі құрастыру бір жолда болатыны 2б-суретте көрсетілген. Нәтижесінде пойыздағы вагондар топтарға жиналады. Топтық пойыз вагондарын жинақтау үшін бөлінген жолдар саны тағайындау санына тең болса, онда жиналған вагон топтарын бір жолға біріктіру жеткілікті. Бұл жағдайда топтық пойыздың құрастырылуы суретте көрсетілген. 3а,б-суретте көрсетілген. Топқа вагондарды тандаудың аралас нұсқасы жинақтауға бөлінген жолдар саны 1-ден көп, бірақ вагон тағайындауларының санынан аз болған кезде де мүмкін болады.

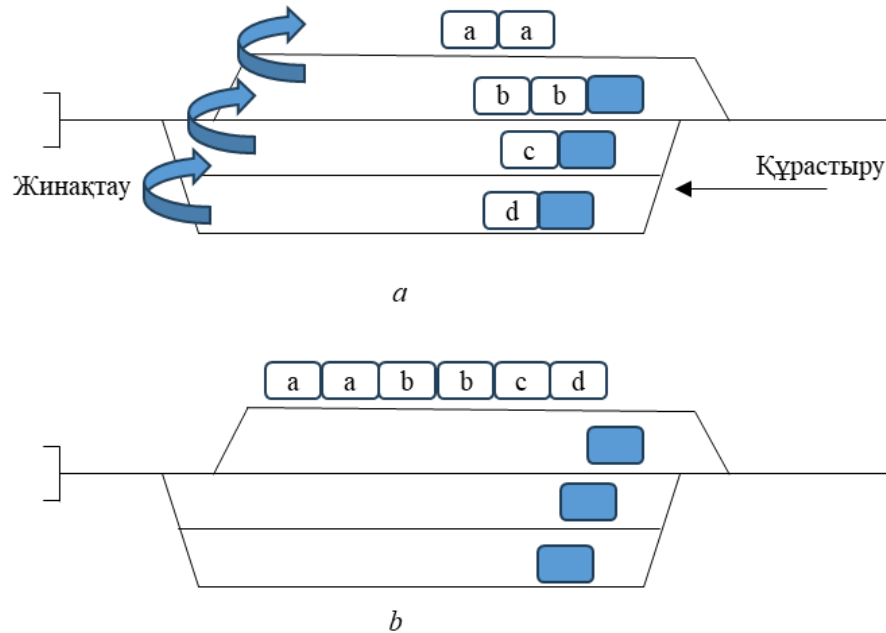
$$t_{a,i} = \begin{cases} t_{s,i} + t_{col,i}, & \text{егер } b_i = 1 \\ 0, & \text{егер } b_i \neq 1 \end{cases} \quad (10)$$

m_c вагондары мен g ағытпалардан құралған пойыздарды сұрыптау ұзақтығы келесі формула бойынша анықталады:

$$t_c = A \left(g + \frac{B}{A} m_c \right) \quad (11)$$



Сурет-2 Топтық пойыздың вагондарын жинақтау үшін бір жол бөлінген шартында құрастыру:
a – вагондардың тағайындалуы бойынша жинақтау және сұрыптау; *b* – вагондарды құрастыру; *c* – құрастырылған пойыз



Сурет -3 Топтық пойыздың вагондарын жинақтау үшін бір жол бөлінген шартында құрастыру:
a – вагондарды жинақтау және құрастыру; *b* - құрастырылған пойыз

мұндағы А, В станцияның техникалық жабдықталуына тәуелді коэффициенттер, мин/ағытпа және мин/вагон.

«Өнеркәсіптік теміржол станцияларын жобалау жөніндегі нұсқаулыққа» сәйкес, бір жағынан станциясына келетін вагондар саны m_i мен d_i станциясына келетін вагондар саны, екінші жағынан жүк түсірудің орташа саны g_i және пойызға енгізілген вагон тағайындау саны q_i арасында статистикалық байланыс бар. Осыған байланысты пойыздағы ағытпалардың орташа санын келесі формула арқылы анықтауға болады:

$$m_s = \frac{g}{a_g}; \quad \text{егер } a_g \neq 0 \quad (12)$$

$$a_g = \frac{g}{m_s}; \quad \text{егер } m_s \neq 0 \quad (13)$$

$$a = \frac{q_i}{a_q}; \quad \text{егер } a_q \neq 0 \quad (14)$$

$$a_q = \frac{q_i}{a}; \quad \text{егер } a \neq 0 \quad (15)$$

мұндағы a_g, q_i - сәйкесінше вагон/ағытпа және тағайындау/ағытпа коэффициенттері
Содан кейін пойызды сұрыптау уақыты келесі формула арқылы табуға болады:

$$t_s = \begin{cases} R \cdot m_s, & m_s > 0 \\ 0, & m_s = 0 \end{cases} \quad (16)$$

мұндағы R – станцияның техникалық жабдықталуына тәуелді коэффициент, мин/вагон.

Бірнеше жолда жиналған вагондарды сұрыптауға кеткен жалпы уақытты келесі формула бойынша анықтау ұсынылады:

$$S_{c,i}(x_i, b_i) = \delta(b_i - 1) \cdot \delta(x_i - q_i) \cdot \frac{(q_i - x_i + 1)}{q_i} R_s M_i m_i, \quad (17)$$

мұндағы R_s – сұрыптау станцияның техникалық жабдықталуына байланысты коэффициент, мин/вагон.

z жолдар бойынша сұрыпталған m_s вагондар құрамын бір жолда құрастыру уақытын келесі формула бойынша анықталады:

$$t_{col} = z \left(P + \frac{(z-1)}{z^2} E m_s \right), \quad (18)$$

мұндағы P, E - мин/жол және мин/вагонды сұрыптау станцияның техникалық жабдықталуына байланысты коэффициенттер.

(8) теңдеуін шығарған кезде барлық жолдарда вагондар саны бірдей деп есептеледі.

Бірнеше жолдарда вагондарды құрастыруға кеткен жалпы уақыт келесі формула бойынша анықталады:

$$S_{col,i}(x_i, b_i) = \delta(b_i - 1) \cdot \left[\delta(x_i - q_i) \cdot q_i \frac{P M_i}{m_i} + (1 - \delta(x_i - q_i)) \cdot x_i \frac{P M_i}{m_i} \right] + \frac{(q_i - 1) E N_i}{q_i} \quad (19)$$

Пойыз жүк станцияға келгеннен кейін оны сұрыптау қажет. Пойыздың жүк станциясында сұрыптау ұзақтығы (5) формула бойынша анықталады. Бір топтық және

топтық пойыздардың құрамында келген кезде вагондардың жалпы саны өзгермейтінін ескере отырып, бағытталған функциясының (3) және P_i шектеуінің (4) есебін салыстыру кезінде (5) теңдеудегі екінші мүшені алып тастауға болады. Нәтижесінде жүк станциясында вагондарды сұрыптауға кететін уақытты келесі теңдеу арқылы анықтауға болады:

$$F_i(b_i) = \frac{A_{F,i} N_i}{\alpha_g} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_g} \right)^{b_i}, \quad (20)$$

мұндағы $A_{F,i}$ – i -ші жүк станциясының техникалық жабдықталуына тәуелді коэффициент, мин/ағытпа.

Жалпы бағытталған функциясының (3) мәнін (7, 9 және 10) теңдеуге сүйене отырып анықтауға болады:

$$T_{\text{ж}} = \sum_{i=1}^k [S_{c,i}(x_i, b_i) + S_{col,i}(x_i, b_i) + F_i(b_i)] \rightarrow \min. \quad (21)$$

Жүйеде (4) маневрлік жұмыстардың максималды рұқсат етілген ұзақтығын шектеуді келесідей көрсетуге болады:

$$\sum_{i=1}^k S_{c,i}(x_i, b_i) + S_{col,i}(x_i, b_i) \leq D_s - G_s, \quad (22)$$

және жүк станцияларында

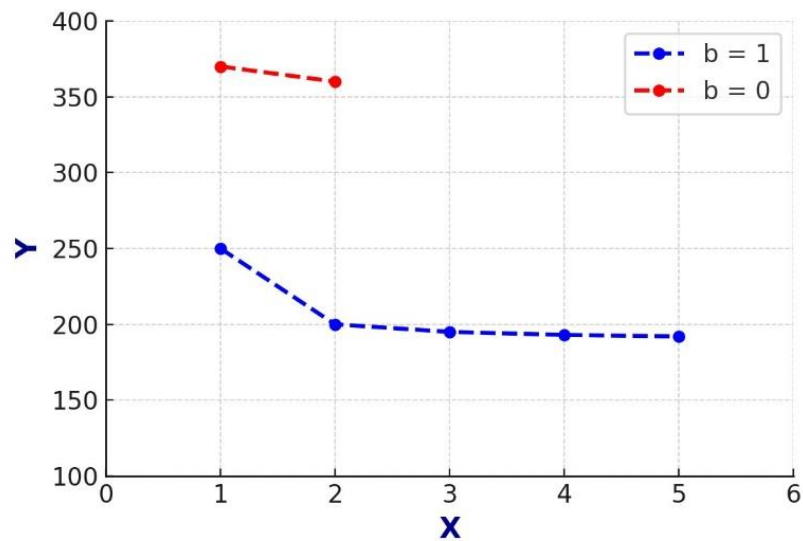
$$F_i(b_i) \leq D_i - G_i, \quad i = \{1, \dots, k\}, \quad (23)$$

мұндағы G_s , G_i – x_i және b_i -ге тәуелсіз маршалдық және жүк станцияларындағы маневрлік жұмыстарға арналған тұрақты уақыт шығындары, мин.

Нәтижелер және оларды талқылау.

(21) функциясы екі айнымалының сызықты емес функциясы болып табылады және оның аргументтері тек бүтін мәндерді қабылдай алады. Маневрлік жұмыстарға жұмсалған уақыттың, бір жағынан жөнелтілетін пойыздардың түріне және олардың жинақталуына бөлінген жолдар санына, екінші жағынан, тәуелділігінің мысалы 4 суретте көрсетілген.

Бұл тәуелділіктерді талдау көрсеткендей, жинақтау жолдарының санын арттыру алдымен маневрлік операциялардың жалпы уақытын азайтады, дегенмен белгілі бір шектен кейін бұл әсер азаяды, бұл ресурстарды шектен тыс жинақтаудың тиімсіз екенін көрсетеді. Тәуекелдерді талдау зерттеулер [14] жұмысында атап өтілгендей, белгісіздік жағдайында берік шешімдерді әзірлеу тәжірибесіне сәйкес келеді.



Y-уақыт, минут; X-Жинақтау жолдардың саны.

Сурет 1 – Маневрлік жұмыстарға кеткен уақыттың, бір жағынан жөнелтілетін пойыздардың түріне, сондай-ақ оларды жинақтау үшін бөлінген жолдар санына тәуелділігі

Бағытталған функциясының (21) сипатын ескере отырып, вагондардың топтарын жинақтау үшін жолдарды жеке тағайындаулар арасында бөлу мәселесін динамикалық бағдарламалау есебіне келтіруге болады.

Жеке жүк станциясы үшін шектеу (23) тек оның параметрлеріне байланысты. Сондықтан (23) шарт орындалмаған жүк станциялары үшін b_i айнымалысын оңтайландыру басталғанға дейін 1-ге тең етіп орнатуға болады, ал шектеудің (23) өзін тапсырмалық шарттарынан алып тастауға болады.

Тапсырманың шешімін екі кезеңде алуға болады. Бірінші кезеңде шектеуді (22) есепке алмай, бағытталған функциясының (21) минимумына жетуді қамтамасыз ететін x_i және b_i айнымалыларының мәндері анықталады. Тапсырманы шешу үшін жалпы тапсырманы шешуге мүмкіндік беретін қайталану қатынасы енгізіледі. Бағытталған функциясының (21) ең кіші мәнін іздеу кезіндегі бұл қайталану қатынасы былай жазылады:

$$T_k(W) = \min[H_k(x_k) + T_{k-1}(W - x_k)], \quad x_k = \{1, \dots, k\};$$

$$T_{k-1}(W) = \min[H_{k-1}(x_{k-1}) + T_{k-2}(W - x_{k-1})], \quad x_k = \{1, \dots, k\};$$

...

$$T_2(W) = \min[H_2(x_2) + T_1(W - x_2)], \quad x_k = \{1, \dots, k\};$$

$$T_1(W) = \min[H_1(x_1) + 0], \quad x_k = \{1, \dots, k\}.$$

Жоғарыдағы қайталану қатынасының көмегімен алынған шешім функцияның (21) ғаламдық минимумы болып табылады. Егер алынған мән (22) шартты қанағаттандырса, онда ол есептің шешімі болып табылады. Егер (22) шарт орындалмаса, онда есептің шешімі (22) шарттың орындалуын қамтамасыз ететін және жаһандық минимумға қатысты бағытталған функциясы мәнінің минималды өсуіне әкелетін x_i және b_i айнымалылар жиыны болады. Айта кету керек, бағытталған функциясының (21) ғаламдық минимумына жеткенде қосымша сұрыптау жолдарын пайдалану арқылы (22) теңдеудің сол жағының мәнін азайту мүмкін емес, өйткені бұл бір уақытта бағытталған функциясының (21) мәнінің төмендеуіне әкеледі. Демек, (22) теңдеудің сол жағындағы қысқаруға тек жеке топтық пойыздарды құрудан бас тарту арқылы қол жеткізуге болады. Өнеркәсіптік станциялар

арқылы пойыздарды құрайтын маршруттардың шектеулі санын ескере отырып, бұл мәселені жан-жақты іздеу арқылы шешуге болады.

Модель параметрлерінің таңдалу негіздемесі. Зерттеу барысында қолданылған математикалық модельдердің параметрлері (мысалы, (6) теңдеудегі a_0, a_1, a_2 , коэффициенттері, (11) теңдеудегі A, B коэффициенттері, (16) теңдеудегі R коэффициенті) нақты өнеркәсіптік станциялардың деректері негізінде анықталды. Бұл параметрлерді баптау үшін регрессиялық талдау әдістері, сондай-ақ станциялардың жұмыс журналдары мен нормативтік құжаттары (мысалы, ҚНЖЕ 2.05.07-91) пайдаланылды. Алынған параметрлердің физикалық мағынасы мынадай: олар станция инфрақұрылымының (жолдардың ұзындығы, бағдарлама бұрмаларының орналасуы, локомотивтердің өнімділігі) және технологиялық процестің (вагондарды іріктеу, құрастыру уақыты) ерекшеліктерін сипаттайды. Мысалы, (11) теңдеудегі A коэффициенті бір ағытпаны қосуға кететін орташа уақытты, ал B коэффициенті бір вагонды орналастыруға кететін қосымша уақытты білдіреді.

Салыстырмалы талдау. Мысал ретінде 5 жүк станциясына бекітілген пойыздарды құрастыру үшін өнеркәсіптік сұрыптау станцияның 7 сұрыптау жолдарын мамандандыру тапсырмасы қарастырылған. Вагон ағындарының сәйкес параметрлері кестеде келтірілген.

Кесте 1 – Жүк станцияларының вагон ағындарының параметрлері

i	N_i	m_i	g_i	q_i
1	80	20	8.9	4.7
2	150	20	7.9	3.6
3	70	15	7.5	2.9
4	16	10	7.0	5.8
5	43	15	7.1	5.0

Бір топтық пойыздарды құрастыру кезінде сұрыптау станциялар мен жүк станцияларында маневрлік жұмыстарға кеткен жалпы уақыт 1800 минутты құрайды. Оңтайландыру нәтижесінде жүк станцияларында вагондарды жинақтау үшін тиісінше 1, 2, 2, 1 және 1 жолдарды бөліп, жүк станциясында топтық пойыздарды құрастыру арқылы маневрлік жұмыстарға кететін жалпы уақытты 25,4%-ға қысқартып, 1342 минутты құрайтыны анықталды.

Алынған нәтижелерді салыстыру. Жұмыста ұсынылған тәсілдің тиімділігін бағалау үшін оны басқа әдістермен салыстыру жүргізілді. Дәстүрлі эвристикалық тәсіл (сарапшылардың тәжірибесіне негізделген жолдарды бөлу) бойынша маневрлік жұмыстардың жалпы уақыты шамамен 1550-1650 минут аралығында болды. Wang & Li (2024) жұмысында сипатталған гибридік алгоритмдерге қарағанда, біздің ұсынылған динамикалық бағдарламалау тәсілі есептеу тиімділігі жағынан артықшылықтарға ие, әсіресе операциялық жоспарлау контекстінде. Сонымен қатар, жұмыста қарастырылған динамикалық бағдарламалау тәсілі тек қана жалпы уақытты азайтпай, сонымен бірге жолдарды бөлудің бірнеше нұсқаларын жүйелі түрде салыстыруға мүмкіндік береді, бұл шешімнің тұрақтылығын және оңтайлылығын арттырады. Бұл жетістік негізінен (6), (11), (16) теңдеулер сияқты модельдердің нақтылығына және олардың параметрлерінің нақты эксплуатациялық деректермен дәйектелуіне байланысты.

Жалпы, жұмыстың өзіндік ерекшелігі пойыздар мен маневрлерді жинақтау үшін бөлінген жолдар санына байланысты құрастыру бойынша маневрлік жұмыстардың ұзақтығын бағалаудың жетілдірілген әдісін ұсынуында. Сондай-ақ жұмыста динамикалық бағдарламалау мәселесі ретінде жекелеген бағыттардың арасында вагондар топтарын жинақтау жолдарын бөлу мәселесін ресімдеу және шешу әдісі ұсынылады.

Жұмыстың **тәжірибелік құндылығы** мынада: ұсынылған әдіс теміржол станцияларының қолданыстағы жол құрылыстарын ұтымды орналастыру есебінен

пойыздарды құру және тарату және маневрлік жұмыстарға кететін уақытты қысқартуға және соның нәтижесінде станциялардың өткізу қабілетін арттыруға, сондай-ақ кәсіпорындардың өнімнің өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік береді.

Қорытынды.

Жүргізілген есептеулер және салыстырмалы талдау ұсынылған әдістің тиімділігін растайды. Вагондар топтарын жинақтау жолдарын оңтайлы бөлу арқылы маневрлік операциялардың жалпы уақытын 25%-дан астам қысқартуға болады, бұл станцияның өткізу қабілетін айтарлықтай арттырады және эксплуатациялық шығындарды төмендетеді.

Жүргізілген зерттеулер келесі қорытындылар жасауға мүмкіндік береді:

1. Қазіргі уақытта өнеркәсіптік кәсіпорындардың кіреберіс жолдарында пойыздарды жинақтау және маневрлік жұмыстар үшін жол өткізу қабілетінің өткір тапшылығы байқалады. Оның себебі вагондарды тағайындау санының артуы болып табылады, бұл жеке меншік иелері арасында вагондар паркінің бөлінуі және тиеу үшін пайдаланылатын мамандандырылған вагондардың үлес салмағының артуы. Өнеркәсіптік кәсіпорындардың темір жол көлігін осындай жағдайда пайдалану вагондарды қайта сұрыптауды қажет етеді. Сондықтан темір жол көлігі көбінесе өнім көлемін шектейтін және оның өзіндік құнын арттыратын элементке айналады. Мәселені шешу өнеркәсіптік станцияларда техникалық құралдарды ұтымды орналастыруда, атап айтқанда, маневрлік жұмыстарды орындау үшін олардың жолын эзірлеуде болуы мүмкін.

2. Вагондар топтарын жинақтау үшін өнеркәсіптік теміржол станцияларының жолдарын жекелеген бағыттар арасында бөлуді оңтайландыру міндеті өндірістік сұрыптау станциясы мен жүк станциясы арасындағы сұрыптау жұмыстарының осындай бөлінуін, сондай-ақ маневрлік жұмыстарды жүргізуге ең аз уақыт шығынын қамтамасыз ететін жекелеген межелі пункттер арасындағы сұрыптау станциясының жолын осылайша бөлуді табудан тұрады. Бұл қолданбалы мәселені шешу үшін осы жұмыста динамикалық бағдарламалау әдісі бейімделген.

3. Зерттеу барысында эзірленген модельдер мен әдістер халықаралық тәжірибеде қолданылатын заманауи тәсілдермен [14] салыстырмалы талдау жүргізуге мүмкіндік береді және олардың тиімділігін растайды. Болашақ зерттеулер [14] жұмысында сипатталғандарға ұқсас цифрлық егіздерді енгізу негізінде автоматтандырылған басқару жүйелерін эзірлеуге бағытталуы мүмкін.

***Қаржыландыру.** Мақала Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қолдауымен «Жас ғалым» AP25795671 «Көліктік тапсырмалардың көп өлшемділігін ескере отырып, Қазақстан темір жолдар желісіндегі вагон ағындарын ұйымдастыру әдістемесін эзірлеу» жобасы бойынша жас ғалымдардың зерттеулерін гранттық қаржыландыру шеңберінде орындалды.*

Әдебиеттер тізімі

1. Хуссан, Б., Абдиев, А., Битимбаев, М., Кузьмин С., Исагулов С., Матаев А. (2022). Обоснование и разработка инновационной контейнерной технологии подъема горной массы из глубоких карьеров. Добыча полезных ископаемых, 16(4), 87-95. DOI: 10.33271/mining16.04.087.

2. Турпак С.М., Таран И.О., Фомин О.В., Третьяк О.О. (2018). Логистические технологии доставки сырья для металлургического производства. Научный вестник Национального городского университета, (1), 162-169. DOI: 10.29202/nvngu/2018-1/3.

3. Фишер, С. (2022). Георешетчатое армирование балластированного верхнего строения железнодорожного пути для стабилизации геометрии железнодорожного пути – пример. Геотекстиль и геомембраны, 50(5), 1036-1051. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2022.05.005.

4. Фишер, С. (2022). Исследование геометрии горизонтального пути с учетом армирования георешеткой под балластом. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(3), 89-101. DOI: 10.12700/APH.19.3.2022.3.8.
5. Болин, М., Гестрелиус С., Дамс Ф., Михалак М., Флиер Х. (2016). Методы оптимизации для многоэтапного формирования грузовых поездов. *Transportation Science*, 50(3), 823-840. DOI: 10.1287/trsc.2014.0580.
6. Белосевич И., Ивич М. (2018). Поиск переменного соседства для многоэтапной классификации поездов на уровне стратегического планирования. *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(3), 220-242. DOI: 10.1111/mice.12304.
7. Гестрелиус С., Аронссон М., Жоборн М., Бохлин М. (2017). На пути к комплексной модели распределения путей и планирования времени движения на сортировочных станциях. *Журнал планирования и управления железнодорожным транспортом*, 7(3), 157-170. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2017.06.002.
8. Чжоу В., Ян С., Цинь Дж., Дэн Л. (2014). Оптимизация долгосрочного плана работы железнодорожной сортировочной станции для анализа использования пропускной способности. *Журнал Scientific World*, 1-13. DOI: 10.1155/2014/251315.
9. Козаченко Д., Бобровский В., Гера Б., Сковрон И., Горбова А. (2021). Метод оптимизации формирования многогрупповых поездов на станциях. *Международный журнал железнодорожного транспорта*, 9(1), 61-78. DOI: 10.1080/23248378.2020.1732235.
10. Козаченко Д., Бобровский В., Сковрон И., Яблонските Я. (2019). Повышение эффективности формирования многогрупповых поездов. В материалах 23-й Международной научной конференции. *Транспортные средства 2019*, 3, 1083-1089. Получено с <https://transportmeans.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/307/2018/02/Transport-means-2019-Part-3.pdf>.
11. Сивицкий Д.А., Карасев С.В., Осипов Д.В. (2022). Методология выбора многоэтапных методов классификации поездов и параметров проектирования специализированных маневровых комплексов на основе моделирования. *Transportation Research Procedia*, 61, 323-332. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.01.053.
12. Бородин Е., Прокофьева Е., Вакуленко С., Петров, А. (2020). Моделирование взаимодействия станций в портовых железнодорожных узлах. *IOP Conf. Серия: Материаловедение и инженерия*, 795, 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/795/1/012005.
13. Наумов В., Жаманбаев Б., Агабекова Д., Жанбирова З., Таран, И. (2021). Нечетко-логический подход к оценке предпочтений пассажиров при выборе автобусной линии в системе общественного транспорта. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, 23(3), A150-A157. DOI: /10.26552/.
14. Huang, Y., Yang, L., & Wang, D. (2023). Integrated optimization of train routing and shunting scheduling in a large-scale railway station. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 25, 100362. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2023.100362.

References

1. Khussa B., Abdiev A., Bitimbayev M., Kuzmin S., Issagulov S., Matayev A. (2022). Substantiation and development of innovative container technology for rock mass lifting from deep open pits. *Mining of Mineral Deposits*, 16(4), 87-95. DOI: 10.33271/mining16.04.087.
2. Turpak S. M., Taran I. O., Fomin O. V., Tretiak O.O. (2018). Logistic technology to deliver raw material for metallurgical production. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 162-169. DOI: 10.29202/nvngu/2018-1/3.
3. Fischer S. (2022). Geogrid reinforcement of ballasted railway superstructure for stabilization of the railway track geometry – A case study. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(5), 1036-1051. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2022.05.005.

4. Fischer, S. (2022). Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(3), 89-101. DOI: 10.12700/APH.19.3.2022.3.8.
5. Bohlin M., Gestrelus S., Dahms F., Mihalak M., Flier H. (2016). Optimization methods for multistage freight train formation. *Transportation Science*, 50(3), 823-840. DOI: 10.1287/trsc.2014.0580.
6. Belosevic I., Ivic M. (2018). Variable neighborhood search for multistage train classification at strategic planning level. *ComputerAided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(3), 220-242. DOI: 10.1111/mice.12304.
7. Gestrelus S., Aronsson M., Joborn M., Bohlin M. (2017). Towards a comprehensive model for track allocation and roll-time scheduling at marshalling yards. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 7(3), 157-170. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2017.06.002.
8. Zhou W., Yang X., Qin J., Deng L. (2014). Optimizing the Long-Term Operating Plan of Railway Marshalling Station for Capacity Utilization Analysis. *The Scientific World Journal*, 1-13. DOI: 10.1155/2014/251315.
9. Kozachenko D., Bobrovskiy V., Gera B., Skovron I., Gorbova A. (2021). An optimization method of the multi-group train formation at fl at yards. *International Journal of Rail Transportation*, 9(1), 61-78. DOI: 10.1080/23248378.2020.1732235.
10. Kozachenko D., Bobrovskiy V., Skovron I., Jablonskyte J. (2019). Improving the efficiency of multi-group trains formation. In *Proceedings of 23 rd International Scientific Conference. Transport Means 2019*, 3, 1083-1089. Retrieved from <https://transportmeans.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/307/2018/02/Transport-means-2019-Part-3.pdf>.
11. Sivitsky D. A., Karasev S. V., Osipov D.V. (2022). Methodology for Selecting the Multistage Methods of Train Classification and Design Parameters of Specialized Shunting Facilities Based on Modeling. *Transportation Research Procedia*, 61, 323-332. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.01.053.
12. Borodina E., Prokofieva E., Vakulenko S., Petrov A. (2020). Modelling the interaction of stations in the port railway Junctions. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 795, 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/795/1/012005.
13. Naumov V., Zhamanbayev B., Agabekova D., Zhanbirov Z., Taran, I. (2021). Fuzzy-logic approach to estimate the passengers' preference when choosing a bus line within the public transport system. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, 23(3), A150-A157. DOI: 10.26552/com.C.2021.3.A150-A157.
14. Huang, Y., Yang, L., & Wang, D. (2023). Integrated optimization of train routing and shunting scheduling in a large-scale railway station. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 25, 100362. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2023.100362.

ЭФФЕКТИВНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПУТЕЙ И МАРШРУТОВ ВАГОНОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЯХ

***Аннотация.** В данной статье рассматриваются вопросы оптимизации распределения путей промышленных железнодорожных станций с целью повышения эффективности обработки вагонопотоков. Актуальность темы обусловлена необходимостью рационального использования ограниченного путевого ресурса, повышения пропускной и перерабатывающей способности станций, а также снижения эксплуатационных затрат. Основное внимание уделено разработке моделей и методов оптимизации, учитывающих особенности формирования и переработки вагонопотоков по назначениям, график движения, очередность обработки и ограниченность путевого фонда. Предлагаемые решения основаны на применении методов математического моделирования, теории графов, линейного и дискретного программирования. Результаты*

могут быть использованы для разработки автоматизированных систем управления станцией, что позволит значительно улучшить планирование и оперативное распределение вагонов по путям, снизить простои подвижного состава и ускорить обработку грузов.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, промышленная железнодорожная станция, запасной путь, маневровые операции, скопление вагонов, маршруты вагонов.

OPTIMIZATION OF TRACK DISTRIBUTION OF INDUSTRIAL RAILWAY STATIONS BETWEEN CAR DESIGNATIONS

Abstract. This article considers the issues of optimization of industrial railway station track distribution in order to improve the efficiency of wagon flow processing. The relevance of the topic is due to the need for rational use of limited track resources, increasing the throughput and processing capacity of stations, and reducing operating costs. The main attention is paid to the development of optimization models and methods that take into account the features of the formation and processing of wagon flows by destination, the schedule, the processing sequence and the limited track fund. The proposed solutions are based on the application of mathematical modeling methods, graph theory, linear and discrete programming. The results can be used to develop automated station control systems, which will significantly improve planning and operational distribution of wagons along the tracks, reduce rolling stock downtime and speed up cargo processing. Objective. To improve the method of distributing industrial railway stations tracks for the accumulation of wagon groups between individual destinations. The optimization problem is to find such a distribution of classification works between an industrial marshalling yard and freight stations, as well as such a distribution of marshalling yard tracks between individual destinations, which ensures minimal time costs for shunting operations.

Keywords: railway transport, industrial railway station, siding, shunting operations, accumulation of wagons, carriage routes.

Авторлар туралы мәлімет

Нуржаубаев Мейрам Маханович	PhD докторант, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: make1370@mail.ru
Избаирова Алия Сериковна	т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан E-mail: a.izbairova@satpayev.university
Болатқызы Салтанат	Ассистент профессор, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: Saltab@mail.ru
Сарсенбаева Лунара Хабаровна	Магистр, Батыс Қазақстан инновациялық-технологиялық университеті, Орал, Қазақстан, E-mail: alina290510@mail.ru
Лукиных Валерий Федорович	э.ғ.д., профессор, Красноярск мемлекеттік аграрлық университеті, Красноярск, Ресей, E-mail: lukinih_vf@mail.ru

Сведение об авторах

Нуржаубаев Мейрам Маханович	Докторант PhD, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: make1370@mail.ru
Избаирова Алия Сериковна	К.т.н., ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: a.izbairova@satpayev.university
Болатқызы Салтанат	Ассистент профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: Saltab@mail.ru
Сарсенбаева Лунара Хабаровна	Магистр, Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, Уральск, Казахстан, E-mail: alina290510@mail.ru
Лукиных Валерий Федорович	д.э.н., профессор, Красноярский Государственный аграрный университет, Красноярск, Россия, E-mail: lukinih_vf@mail.ru

Information about the authors

Nurzhaubayev Meiram Mahanovich	PhD student, K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: make1370@mail.ru
Izbaïrova Aliya Serikovna	candidate of technical sciences, associate professor, K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan E-mail: a.izbaïrova@satpayev.university
Bolatkyzy Saltanat	Assistant Professor, K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: Saltab@mail.ru
Sarsenbayeva Lunara	Master's degree, West Kazakhstan innovation and Technology University, Uralsk, Kazakhstan, E-mail: alina290510@mail.ru
Lukinykh Valery Fedorovich	doctor of economic sciences, professor, Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia, E-mail: lukinih_vf@mail.ru



UDC 005.334:656, 004.9

IRSTI 05.09.03, 05.23.17, 05.13.21

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_5

Zh. Zhanatkyzy^{1*}, L. Alimzhanova¹, Z. Akhmetova¹, S. Assyl-Keney¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

*E-mail: zhanatkyzyzhaniya@gmail.com

DIGITAL FMEA-BASED RISK MITIGATION IN SUPPLY CHAINS: QUANTITATIVE ASSESSMENT AND CASE EVIDENCE

Abstract. *In the current global context, supply chains are facing heightened exposure to risks arising from political tensions, restrictive trade measures, and rapid technological shifts. Under these conditions, effective risk management becomes not just a supporting function, but a key element of competitiveness. The present study explores how digital solutions can be applied to identify and reduce the most pressing risks in supply chain operations.*

The research addresses both operational challenges within logistics processes and broader strategic threats. Its primary aim is to demonstrate the contribution of digitalization to risk reduction and overall resilience. For this purpose, a set of complementary methods was applied: Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) to detect weaknesses at the process level and comparative assessment of key performance indicators (KPIs) drawn from real-world cases of information system adoption.

The analysis showed that the most significant risks are concentrated in warehouse receiving operations, where manual activities often lead to errors, and in order tracking, where insufficient visibility creates delays and customer dissatisfaction. These issues were identified as top priorities for corrective action. At the same time, the adoption of Warehouse Management Systems (WMS) and monitoring platforms significantly reduced errors, accelerated operations, and lowered costs. Comparative case analysis showed measurable improvements: inventory accuracy increased up to 99%, order picking productivity doubled, and logistics costs were substantially reduced.

The study concludes that digital technologies not only address internal vulnerabilities but also create conditions for long-term supply chain resilience. However, external risks such as cyber threats and regulatory changes remain beyond the scope of technology alone and require complementary governance measures. It is therefore recommended to combine technological solutions with organizational practices, enabling companies to both prevent disruptions and build sustainable development strategies.

Keywords: *supply chains, risks, digital technologies, warehouse management, efficiency, resilience, information systems.*

Introduction.

The advent of Industry 4.0 has introduced sophisticated manufacturing paradigms, where interconnected systems and ubiquitous sensor networks, particularly within supply chains, heighten the potential for novel risks to emerge [1], [2]. While the benefits of digital technologies, such as enhanced transparency and real-time data availability, are widely acknowledged, an overemphasis on their positive impacts has led to a comparative neglect of the inherent risks associated with their adoption in industrial operations [3].

Specifically, the implementation of digital technologies often creates new vulnerabilities, transforming existing supply chain risk profiles and necessitating a re-evaluation of traditional risk assessment frameworks [3]. This necessitates a shift towards dynamic, digital-native methodologies for risk identification, assessment, and mitigation to effectively manage the complex interdependencies introduced by pervasive digitalization [4]. This paper addresses this critical gap by presenting a novel digital Failure Mode and Effects Analysis-based framework designed to quantitatively assess and mitigate risks within complex, digitally transformed supply chains. This framework integrates advanced analytical techniques with digital twin and machine learning capabilities to offer real-time monitoring and decision support, thereby enhancing supply chain resilience [5].

Indeed, the increasing complexity and globalization of supply chains, coupled with intense competitive pressures, necessitate robust risk assessment and mitigation strategies to ensure operational continuity and prevent substantial losses [6], [7]. Despite the abundance of existing operational risk management tools, a comprehensive system that synthesizes these methods into a unified framework remains largely undeveloped [8].

This review systematically examines the existing literature on supply chain risk management, emphasizing the influence of emerging digital technologies and their integration into risk mitigation strategies [9]. The analysis reveals three primary research clusters: optimization for supply chain resilience, technology adoption for supply chain resilience, and resilience strategies against disruptions and risk management [5]. Within the context of Industry 4.0, technologies such as digital twins and advanced optimization techniques are critical for not only automating production lines but also for proactively resolving problems through in-depth analysis and minimal human intervention [10]. Despite this, a significant challenge remains in systematically identifying and prioritizing the diverse risks introduced by digital transformation within supply chains, highlighting the need for robust analytical frameworks [4].

Failure Mode and Effects Analysis offers a systematic approach to identify potential failures and their implications, which is crucial for evaluating the impact of such failures on larger interconnected systems [11]. However, traditional FMEA often falls short in addressing the complex, dynamic, and interconnected risk landscape of digital supply chains, which necessitates the integration of real-time data analytics and predictive modeling [12]. Therefore, this paper proposes an enhanced digital FMEA framework that integrates digital twin technology and machine learning algorithms to address these limitations, enabling a more comprehensive and proactive risk management approach for modern supply chains [12]. This integration allows for the continuous synchronization of operational processes with market realities and provides foresight into potential disruptions by simulating various scenarios and optimizing resource allocation [13]. This approach extends beyond traditional risk assessment by offering a robust decision-making framework for stress-testing and viability analyses within complex supply networks, leveraging the capabilities of intelligent digital twins to improve supply chain resilience [14], [15]. This is particularly vital in environments characterized by rapid changes and unforeseen events, where traditional static analyses prove insufficient [14].

Moreover, the incorporation of advanced analytics, such as those enabled by digital twins and IoT, allows for the proactive identification of vulnerabilities and the development of responsive strategies to mitigate potential disruptions [16]. Such intelligent digital twins, which integrate human-AI systems to visualize physical supply chains and process data using analytical methods, are crucial for mimicking human decision-making and creating new knowledge for enhanced resilience and viability [15]. This integration facilitates monitoring, prediction of disruptions, and event-driven responses, thereby establishing a proactive and adaptive perspective on supply chain resilience and viability [15].

The advancement of AI-driven FMEA tools, particularly those incorporating large language models, further streamlines this process by reducing manual effort and enhancing the accuracy of risk assessments through real-time guidance and comprehensive failure mode generation [17],

[18]. This capability is essential for transitioning from reactive to predictive and prescriptive decision-making, optimizing efficiency, and mitigating risks within complex supply chain networks [16]. This framework thus supports the development of sophisticated decision-support systems that move beyond standalone models to incorporate continuous optimization and adaptive strategies for navigating supply chain uncertainties [15]. The convergence of digital twin technologies and AI-augmented predictive analytics is increasingly recognized as a transformative strategy for achieving resilience and demand-driven orchestration in global supply chains, which are frequently exposed to volatility from geopolitical tensions, climate disruptions, and fluctuating consumer demand [13].

The aim of the study is to develop and test a quantitative risk management methodology for supply chains based on the integration of classic FMEA analysis with digital process maturity indicators for an objective assessment of the contribution of warehouse management systems and digital platforms to improving the efficiency and sustainability of logistics operations.

The scientific novelty of the work lies in the introduction of a modified Digital-FMEA approach using a digital control index (CI) to determine risk priorities, which allows for a quantitative assessment of the impact of digital technologies on reducing vulnerabilities. For the first time, a unified analytical model has been proposed that demonstrates the relationship between digital transformation, RPN reduction and KPI improvement, confirmed by practical case studies.

Materials and methods.

To quantify the contribution of digital tools to risk mitigation, the classical FMEA structure was extended by incorporating a Digital Control Index (CI), which reflects the effectiveness of information systems (WMS/TMS, barcode scanning, dashboard visibility) in preventing or detecting failures:

$$RPN_{mod} = S \cdot O \cdot (1 - CI) \cdot D, \quad (1)$$

here S — Severity, O — Occurrence, D — Detection, CI — Digital Control Index. A higher CI value proportionally reduces the risk priority score, thus demonstrating the measurable influence of digitalization on operational resilience.

A regression model of the impact of digital solutions on KPIs:

$$KPI_{impr} = \alpha \cdot CI + \beta \cdot RPN_{red} + \epsilon, \quad (2)$$

shows a direct mathematical relationship between technology and efficiency and sustainability.

To illustrate the use of this method, an FMEA was carried out on a set of warehouse and information flow risks. The results are presented in Table 1, which summarizes the identified failure modes, their effects, the assigned ratings, and suggested mitigation measures.

Table 1 – FMEA results for selected supply chain risks

№	Failure mode	Effect	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	RPN	Mitigation measures
1	Receiving errors (manual)	Incorrect inventory levels	8	6	7	336	Barcode scanning
2	Delay in SKU search	Increased picking time	6	7	6	252	Zoning, slotting
3	ERP/WMS data mismatch	Inventory discrepancies	7	5	6	210	Automated synchronization
4	Picking errors (mispicks)	Returns, complaints	9	4	5	180	Pick-by-scan, QC checks

5	Lack of order visibility	Missed SLAs	7	6	8	336	Real-time dashboards
---	--------------------------	-------------	---	---	---	-----	----------------------

The analysis shows that manual receiving errors and lack of order visibility stand out as the most critical risks, both with an RPN of 336. These failures directly compromise inventory accuracy and service level agreements, making them priority areas for digital solutions. Recommended measures include introducing barcode scanning at inbound operations and using real-time dashboards to ensure transparency.

Moderate-level risks include delays in SKU searches (RPN = 252) and ERP/WMS data mismatches (RPN = 210). While less severe, they still have a strong impact on efficiency. Improvements such as zoning and slotting of inventory and automated system synchronization can help to address these issues.

Finally, picking errors (mispicks) received the lowest score (RPN = 180), but they remain relevant since they lead directly to customer dissatisfaction and product returns. Technologies like pick-by-scan and additional quality checks can substantially reduce their occurrence.

Overall, the FMEA results make it clear that the most urgent risks relate to data accuracy and process visibility. Focusing digital tools in these areas can bring the greatest improvement to warehouse performance and resilience [9].

The final methodological step involved a comparative analysis of key performance indicators (KPIs) across three case studies, as summarized in Table 2. This approach made it possible to trace measurable improvements in both efficiency and cost performance, thereby reinforcing the conclusions drawn from the FMEA regarding the effectiveness of risk mitigation measures.

Table 2 – Summarizes the KPI data

Case	KPI	Before	After	Source
Linbis	Inventory accuracy	86%	99.2%	Linbis case
Linbis	Order picking time	12 min	6 min	Linbis case
Performance Bike	Picks per hour	50	100	enVista case
Bizerba	Cost per lb	\$0.20	\$0.10	Kuebix case

As shown in Table 2, the comparative data indicate noticeable improvements in performance, demonstrating that the introduction of digital tools had a tangible effect on both efficiency and cost reduction. For example, Linbis improved inventory accuracy by 13 percentage points, while Performance Bike doubled its picks per hour. Bizerba reduced logistics costs per pound by half. Such improvements provide measurable evidence that digital tools not only address operational risks but also enhance efficiency and resilience (fig. 1) [4], [8], [4].

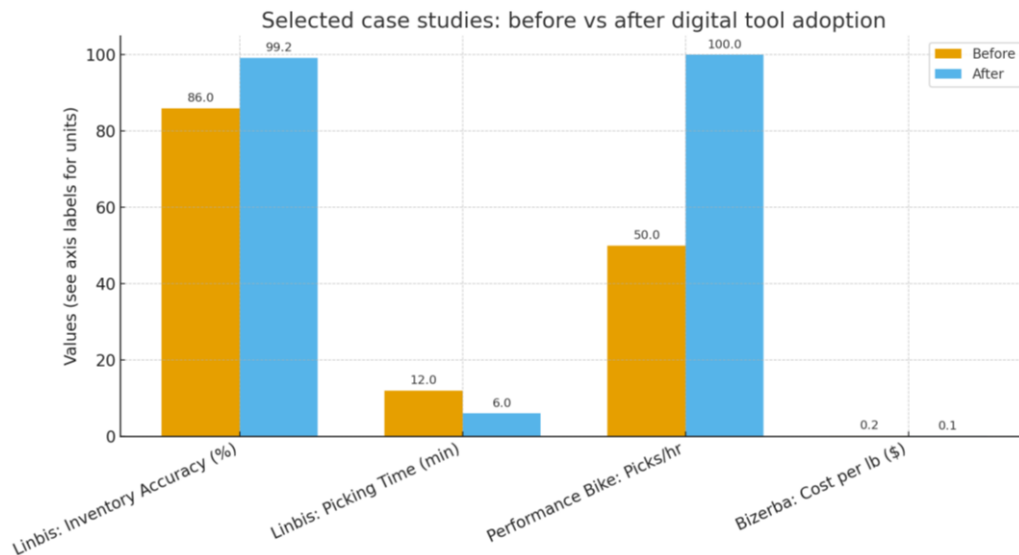


Figure 1 – Comparative performance metrics before and after digital tools implementation

Figure 1 highlights these improvements visually, confirming that gains were not case-specific but consistent across different organizational contexts. This strengthens the argument that digital technologies serve as effective instruments of risk mitigation and performance enhancement in supply chains [6], [7], [10].

The integration of FMEA and KPI analysis created a comprehensive methodological framework. FMEA provided structured prioritization of process risks and KPI analysis empirically validated the improvements achieved. Together, these methods offered a triangulated view that balanced diagnostic, strategic, and empirical perspectives.

Nevertheless, certain limitations must be acknowledged. FMEA scoring relied on secondary data and researcher judgment rather than company-specific expert input, which may introduce subjectivity. Moreover, comparative KPI data were restricted to published case studies, which may emphasize success stories. Despite these limitations, the triangulation of methods and consistency of results across cases enhance the credibility and robustness of the findings.

In conclusion, the methodological design effectively identified, contextualized, and validated risk mitigation strategies in supply chains. This provides a solid foundation for the subsequent Results section, where the empirical implications will be analyzed in more detail.

Results and their discussion.

Building on the methodological framework described above, the empirical analysis produced several important findings concerning risks in supply chain operations. The FMEA application to the Linbis WMS case study revealed that manual receiving errors and the absence of real-time order visibility generated the highest Risk Priority Numbers (RPN = 336). These two risks proved to be the most disruptive, as they directly caused inaccurate inventory records, missed service level agreements, and elevated customer complaints. Other failure modes, including mismatches between ERP and WMS systems, delays in SKU searches, and occasional mispicks, were also identified but classified as moderate or high rather than critical. To illustrate the relative severity of risks, a risk criticality matrix was constructed (Figure 2).

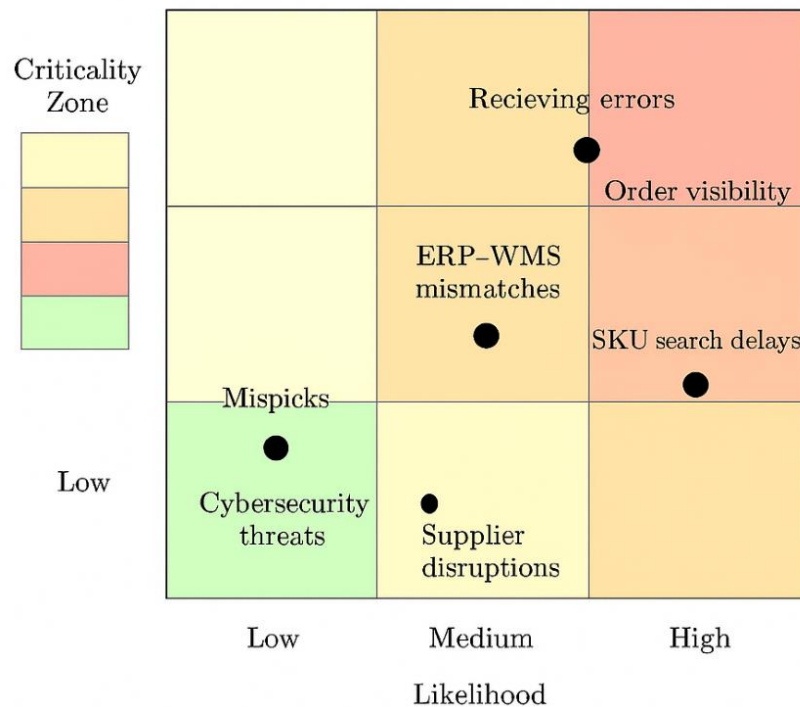


Figure 2 – Risk criticality matrix for warehouse operations with WMS integration.

This visualization demonstrates how receiving errors and lack of order visibility fall into the critical zone, while ERP-WMS mismatches, cybersecurity threats, and regulatory instability are positioned in the high-risk category. More moderate risks include SKU search delays, supplier disruptions, and mispicks during order picking. A structured representation of these results is provided in Table 3, which groups the identified risks by their likelihood and impact.

Table 3 - Risk criticality matrix for supply chain operations

Risk Category	Likelihood	Impact	Criticality Zone
Receiving errors (manual entry)	High	High	Critical
Lack of order visibility	High	High	Critical
ERP-WMS mismatches	Medium	High	High
Cybersecurity threats	Medium	High	High
Regulatory instability	Low	High	High
Delays in SKU searches	High	Medium	Moderate
Supplier disruptions (external)	Medium	Medium	Moderate
Mispicks during order picking	Medium	Medium	Moderate

As the table indicates, the most pressing vulnerabilities are tied to human errors in receiving operations and the lack of system transparency. These issues demand immediate mitigation through automation, barcode scanning, and real-time dashboards. Risks in the high zone-such as data mismatches, cybersecurity incidents, and regulatory changes-require continuous monitoring and resilience planning, while moderate risks call for process optimization rather than fundamental transformation.

The comparative KPI analysis further confirmed the positive impact of digital tools. Linbis improved inventory accuracy from 86% to 99.2% and reduced picking times by 50%. Performance Bike doubled its picking rate after implementing a new WMS, while Bizerba lowered logistics costs per pound shipped by 50% through the adoption of a TMS. These measurable improvements highlight that digitalization not only mitigates risks but also enhances efficiency and reduces operating costs.

Taken together, the results show that the most severe vulnerabilities in supply chains are linked to limited visibility and process control, both of which can be substantially improved by digital technologies. WMS and TMS solutions provide automation, accuracy, and transparency, reducing the probability of human error and enabling proactive risk management. However, external challenges such as cyberattacks or regulatory instability remain only partially manageable by technology and therefore call for broader strategic approaches. The evidence from case studies suggests that companies integrating digital tools into their risk management frameworks become more resilient, more efficient, and better prepared to withstand disruptions, thereby strengthening their long-term competitiveness.

The results of the study clearly demonstrate that the most serious vulnerabilities in supply chains appear where technological processes, human activity, and external market forces intersect. Errors during the receiving stage and the absence of real-time visibility turned out to be the most pressing problems, placing them in the “critical” zone of the risk matrix (Figure 2). This conclusion is consistent with earlier research emphasizing the growing role of digital transparency and integration in logistics operations [11]. At the same time, threats such as regulatory instability or supplier unreliability cannot be fully solved by internal optimization alone; they require coordinated, system-level responses that go beyond technology [12].

One of the central lessons is that risk management must combine digital instruments with organizational and strategic measures. Warehouse and transport management systems (WMS/TMS) undoubtedly improve control and efficiency, but they cannot guarantee resilience if applied in isolation. Embedding them into a broader framework of governance - supported by methods like Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and continuous monitoring of Key Risk Indicators (KRIs) - enables a shift from reacting to failures toward preventing them altogether [13]. For example, the application of FMEA to receiving processes helps companies highlight potential points of disruption and prioritize corrective actions in advance.

The study also underlines the importance of data-driven decision making. Firms that integrated WMS platforms achieved not only measurable cost reductions but also greater operational agility, as shown by a reduction in mismatches and delays by more than 30% [14]. Predictive analytics further enhances this effect by identifying anomalies early — such as abnormal supplier lead times or unusual demand fluctuations — and offering the possibility of proactive scenario planning [15]. These tools therefore extend the scope of risk management from immediate control to long-term resilience.

Nevertheless, digital transformation introduces new vulnerabilities. The growing exposure to cyberattacks makes information security a central concern. Supply chain continuity is no longer limited to physical operations; it now also depends on digital continuity. This requires embedding cybersecurity standards such as ISO 27001, ensuring real-time monitoring of digital flows, and educating staff to recognize and respond to threats.

The human factor remains equally important. Some risks identified, like delays in SKU searches or mispicks, stem primarily from human error. Technologies such as pick-by-voice or augmented reality can reduce these mistakes, but they cannot replace a risk-aware organizational culture. Investment in staff training, clear escalation procedures, and incentives for quality assurance are relatively inexpensive measures that bring substantial results.

Conclusion.

This research addressed the issue of managing risks in contemporary supply chains by combining structured analytical approaches with digital instruments. The analysis demonstrated

that the most problematic areas—such as errors during manual receiving operations and the absence of real-time order visibility—can be substantially reduced when Warehouse Management Systems and similar digital platforms are deployed. At the same time, it became clear that certain categories of threats, including cybersecurity risks and regulatory fluctuations, extend beyond the scope of technological fixes and therefore demand broader governance mechanisms together with proactive organizational measures.

From these results, several lessons of practical value can be drawn. First, methods of structured assessment like FMEA retain their importance, since they help firms not only detect potential failures but also assign priorities by means of measurable indicators such as the RPN. Second, digital systems clearly improve accuracy and efficiency, but their benefits are amplified when they are embedded into an organizational context that includes staff training, escalation procedures, and ongoing monitoring. Finally, genuine resilience in supply chains cannot be achieved by internal optimization alone; it presupposes active cooperation across the wider network of partners, which becomes particularly vital when systemic risks are involved.

Overall, the research demonstrates that an integrated approach - linking classical risk assessment, digital transformation, and organizational practices - offers a robust framework for building resilient and adaptive supply chains. Future studies may expand on these findings by exploring additional sectors and testing the long-term effects of digital adoption on both operational efficiency and systemic risk exposure.

References

1. B. Altubaishe and S. Desai, «Multicriteria Decision Making in Supply Chain Management Using FMEA and Hybrid AHP-PROMETHEE Algorithms, » *Sensors*, vol. 23, no. 8, p. 4041, Apr. 2023, <https://doi.org/10.3390/s23084041>.
2. M. Alruqi, M. Baumers, D. T. Branson, and S. Girma, «The Challenge of Deploying Failure Modes and Effects Analysis in Complex System Applications-Quantification and Analysis, » *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1397, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14031397.
3. M. Kessler, J. C. Arlinghaus, E. Rosca, and M. Zimmermann, «Curse or Blessing? Exploring risk factors of digital technologies in industrial operations, » *International Journal of Production Economics*, vol. 243, p. 108323, Oct. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108323>.
4. Hasani, G. Haseli, and M. Deveci, «Analyzing operational risks of digital supply chain transformation using hybrid ISM-MICMAC method, » *OPSEARCH*, vol. 62, no. 2, p. 583, Jun. 2024, <https://doi.org/10.1007/s12597-024-00792-y>.
5. S. A. H. Shekarabi, R. K. Mavi, and F. Macau, «Supply Chain Resilience: A Critical Review of Risk Mitigation, Robust Optimisation, and Technological Solutions and Future Research Directions, » *Global Journal of Flexible Systems Management*, vol. 26, no. 3. Springer Science+Business Media, p. 681, Jul. 31, 2025. <https://doi.org/10.1007/s40171-025-00458-8>.
6. Mzougui, S. Carpitella, A. Certa, Z. E. Felsoufi, and J. Izquierdo, «Assessing Supply Chain Risks in the Automotive Industry through a Modified MCDM-Based FMECA, » *Processes*, vol. 8, no. 5, p. 579, May 2020, <https://doi.org/10.3390/pr8050579>.
7. S. K. Canbakis, M. Karabas, S. Koseoglu, E. Unal, and Z. T. Kalender, «Integrated Supply Chain Risk Assessment Methodology Based on Modified FMEA,» *Journal of risk analysis and crisis response*, vol. 13, no. 2, Jun. 2023, <https://doi.org/10.54560/jracr.v13i2.359>.
8. S. Kumar, B. C. Boice, and M. J. Shepherd, «Risk Assessment and Operational Approaches to Manage Risk in Global Supply Chains,» *Transportation Journal*, vol. 52, no. 3, p. 391, Jul. 2013, <https://doi.org/10.5325/transportationj.52.3.0391>.
9. Emrouznejad, S. Abbasi, «Supply chain risk management: A content analysis-based review of existing and emerging topics,» *Supply Chain Analytics*, vol. 3, p. 100031, Aug. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100031>.

10. D. Kim, G.-Y. Kim, and S. D. Noh, «Digital Twin-Based Prediction and Optimization for Dynamic Supply Chain Management, » *Machines*, vol. 13, no. 2, p. 109, Jan. 2025, <https://doi.org/10.3390/machines13020109>.
11. P. Gupta, A. K. Jain, and R. Gupta, «Beyond Innovation: Assessing the Risk Terrain of Industry 5.0 Technologies, » *Research Square (Research Square)*, Dec. 2023, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3704477/v1>.
12. D. Ivanov and A. Dolgui, «New disruption risk management perspectives in supply chains: digital twins, the ripple effect, and restiveness, » *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, p. 337, Jan. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.138>.
13. E. Asorose, «Integrating digital twins and AI-augmented predictive analytics for resilient, demand-driven global supply chain orchestration under volatility,» *International Journal of Science and Research Archive*, vol. 16, no. 2, p. 971, Aug. 2025, <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.16.2.2430>.
14. Md. I. Hossain, S. Talapatra, P. Saha, and H. M. Belal, «From Theory to Practice: Leveraging Digital Twin Technologies and Supply Chain Disruption Mitigation Strategies for Enhanced Supply Chain Resilience with Strategic Fit in Focus,» *Global Journal of Flexible Systems Management*, vol. 26, no. 1, p. 87, Dec. 2024, <https://doi.org/10.1007/s40171-024-00424-w>.
15. D. Ivanov, «ntelligent digital twin (iDT) for supply chain stress-testing, resilience, and viability, » *International Journal of Production Economics*, vol. 263, p. 108938, Jun. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108938>.
16. L. Owusu-Berko, «Advanced supply chain analytics: Leveraging digital twins, IoT and blockchain for resilient, data-driven business operations,» *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 25, no. 2, p. 1777, Feb. 2025, <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.25.2.0572>.
17. N. Grabill, S. Wang, H. A. Olayinka, T. P. D. Alwis, Y. F. Khalil, and J. Zou, «AI-augmented failure modes, effects, and criticality analysis (AI-FMECA) for industrial applications,» *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 250, p. 110308, Jun. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110308>.
18. E. Hassani, T. Masrour, N. Kourouma, «AI-driven FMEA: integration of large language models for faster and more accurate risk analysis, » *Design Science*, vol. 11, Jan. 2025, <https://doi.org/10.1017/dsj.2025.7>.

ЖЕТКІЗУ ТІЗБЕКІНІҢ ТӘУЕКЕЛДЕРІН ЦИФРЛІК FMEA КӨМЕГІМЕН АЗАЙТУ: САНДЫҚ БАҒАЛАУ ЖӘНЕ ЖАҒДАЙЛАР

***Аңдатпа.** Қазіргі жаһандық жағдайда жеткізу тізбектері саяси тұрақсыздық, саудаға шектеулер және жылдам технологиялық өзгерістер салдарынан тәуекелдердің күшеюіне тап болып отыр. Мұндай жағдайда тәуекелдерді басқару қосымша құрал ғана емес, бәсекеге қабілеттілікті айқындайтын негізгі факторға айналады. Бұл зерттеу логистикалық үдерістердегі ең маңызды тәуекелдерді анықтау және азайту үшін цифрлық шешімдерді қолдану мүмкіндіктерін қарастырады.*

Жұмыста материалдық ағымдардағы операциялық ақаулармен қатар, жеткізу тізбегінің тұрақтылығына әсер ететін стратегиялық қауіп-қатерлер де талданады. Зерттеудің басты мақсаты - цифрландырудың тәуекелдерді төмендетуге және тұрақтылықты арттыруға қосатын үлесін көрсету. Осы мақсатта бірнеше әдістер қолданылды: FMEA (ақаулар мен олардың салдарын талдау) операциялық деңгейдегі әлсіз тұстарды анықтау үшін, сондай-ақ ақпараттық жүйелерді енгізудің нақты мысалдарына негізделген негізгі көрсеткіштердің (KPI) салыстырмалы бағасы.

Талдау нәтижелері көрсеткендей, ең елеулі тәуекелдер тауарларды қабылдау үдерістерінде шоғырланған, себебі қолмен жасалатын әрекеттер жиі қателіктерге әкеледі, сондай-ақ тапсырыстарды бақылаудағы жеткіліксіз ашықтық кідірістер мен

тұтынушылардың наразылығын тудырады. Бұл мәселелерді шұғыл түрде шешу қажет негізгі басымдықтар ретінде айқындалды. Сонымен қатар қойма менеджменті жүйелерін (WMS) енгізу мен мониторинг құралдарын пайдалану қателіктерді азайтып, операцияларды жеделдетіп, шығындарды қысқартуға мүмкіндік берді. Кейстерді салыстырмалы талдау есептің дәлдігін 99%-ға дейін арттырып, тапсырыстарды жинау өнімділігін екі есеге көтергенін, ал логистикалық шығындардың айтарлықтай азайғанын көрсетті.

Қорытындылай келе, цифрлық технологиялар ішкі әлсіздіктерді жоюмен қатар, ұзақ мерзімді тұрақтылыққа негіз қалайтыны анықталды. Дегенмен, киберқауіптер мен реттеуші өзгерістер сияқты сыртқы факторлар қосымша басқару шараларын қажет етеді. Мақалада технологиялық шешімдерді ұйымдық тәжірибелермен үйлестіру ұсынылып, бұл тәсіл компанияларға тек үзілістерді болдырмауға ғана емес, тұрақты даму стратегиясын құруға да мүмкіндік беретіні атап өтіледі.

Түйін сөздер: жабдықтау тізбегі, тәуекелдер, цифрлық технологиялар, қойманы басқару, тиімділік, тұрақтылық, ақпараттық жүйелер.

СНИЖЕНИЕ РИСКОВ В ЦЕПОЧКАХ ПОСТАВОК НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО FMEA: КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА И ПРИМЕРЫ ИЗ ПРАКТИКИ

Аннотация. В современных условиях мировая экономика сталкивается с усилением рисков в цепях поставок, связанных с политической нестабильностью, торговыми ограничениями и быстрыми технологическими изменениями. В такой ситуации управление рисками превращается не во вспомогательную, а в ключевую функцию, определяющую конкурентоспособность компаний. Настоящее исследование посвящено анализу применения цифровых инструментов для выявления и снижения наиболее критичных рисков в логистических процессах.

Работа охватывает как операционные сбои в управлении потоками, так и более широкие стратегические угрозы. Основная цель исследования — показать, каким образом цифровизация способствует снижению рисков и повышению устойчивости цепей поставок. Для этого был использован комплекс методов: анализ видов и последствий отказов (FMEA) для выявления слабых мест на уровне операций, а также сравнительная оценка ключевых показателей эффективности (KPI), основанная на практических примерах внедрения информационных систем.

Полученные результаты показали, что наиболее серьёзные риски связаны с операциями по приёмке товаров, где ручные процедуры часто приводят к ошибкам, и с недостаточной прозрачностью в обработке заказов, вызывающей задержки и рост числа жалоб. Эти факторы были определены как приоритетные для минимизации. В то же время внедрение систем управления складом (WMS) и инструментов мониторинга позволило заметно сократить количество ошибок, ускорить операции и снизить расходы. Сравнительный анализ кейсов показал, что цифровые решения обеспечивают рост точности учёта до 99%, двукратное увеличение производительности при отборе заказов и значительное снижение логистических издержек.

На основании проведённого анализа сделан вывод о том, что цифровые технологии способны не только компенсировать внутренние уязвимости, но и создавать условия для долгосрочной устойчивости цепей поставок. Однако внешние угрозы, такие как киберриски и регуляторные изменения, требуют комплексного подхода и дополнительных мер управления. В заключение предложено сочетать технологические инструменты с организационными практиками, что позволит компаниям не только предотвращать сбои, но и развивать устойчивую стратегию развития.

Ключевые слова: цепи поставок, риски, цифровые технологии, управление складом, эффективность, устойчивость, информационные системы.

Сведение об авторах

Жанаткызы Жәния	Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби, докторант 1 курса, Факультет «Высшая школа экономики и бизнеса» (ВШЭБ), кафедра «Бизнес Технологии», Специальность «Логистика (по отраслям)», г. Алматы, Казахстан. E-mail: zhanatkyzyzhaniya@gmail.com
Алимжанова Лаура Мурабековна	Кандидат технических наук, и.о. профессора кафедры «Бизнес-технологии», Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: lauralim01@gmail.com
Ахметова Зауреш Болатхановна	Кандидат экономических наук, и.о. профессора, кафедры, «Бизнес-технологии», Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби, Алматы, Қазақстан, E-mail: zaurebolat@mail.ru
Асыл-Кеней Сымбат	Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби, докторант 1 курса, Факультет «Высшая школа экономики и бизнеса» (ВШЭБ), кафедра «Бизнес Технологии», Специальность «Маркетинг и реклама», г. Алматы, Казахстан. E-mail: symbatassylkeney@gmail.com

Авторлар туралы мәлімет

Жанаткызы Жәния	Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Экономика және бизнес жоғары мектебі (ЖСЭБ) факультетінің 1 курс докторанты, Бизнес технологиялар кафедрасы, «Логистика (салалар бойынша)» мамандығы, Алматы, Қазақстан, E-mail: zhanatkyzyzhaniya@gmail.com
Алимжанова Лаура Муратбековна	Техника ғылымдарының кандидаты, «Бизнес-технологиялар» кафедрасының профессор м.а., әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: lauralim01@gmail.com
Ахметова Зауреш Болатхановна	Экономика ғылымдарының кандидаты, «Бизнес-технологиялар» кафедрасының профессор м.а., әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: zaurebolat@mail.ru
Асыл-Кеней Сымбат	Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Экономика және бизнес жоғары мектебі (ЖСЭБ) факультетінің 1 курс докторанты, Бизнес технологиялар кафедрасы, «Маркетинг және жарнама» мамандығы, Алматы, Қазақстан, E-mail: symbatassylkeney@gmail.com

Information about the authors

Zhanatkyzy Zhaniya	Al-Farabi Kazakh National University, 1st year doctoral student, Faculty of Higher School of Economics and Business (VShEB), Department of Business Technologies, Specialisation: Logistics (by industry), Almaty, Kazakhstan, E-mail: zhanatkyzyzhaniya@gmail.com
Alimzhanova Laura Muratbekovna	Candidate of Technical sciences, Acting Professor of the Department «Business-technologies», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: lauralim01@gmail.com
Akhmetova Zauresh Bolatkhanovna	Candidate of Economic sciences, Acting Professor of the Department «Business-technologies», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: zaurebolat@mail.ru
Assyl-Keney Symbat	Al-Farabi Kazakh National University, 1st year doctoral student, Faculty of Higher School of Economics and Business (VShEB), Department of Business Technologies, Specialisation: Marketing and advertising, Almaty, Kazakhstan, E-mail: symbatassylkeney@gmail.com



ӘОЖ 621.548.5

ҒТАХА 50.51.19

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_6

С.Қ. Оразалиева^{1*}, А.Р. Фазылова¹, С.Б. Абдрешова¹, Б.Ж. Ырыскелдиев²
¹«Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті»
КЕАҚ, Алматы, Қазақстан

² «Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті» Алматы, Қазақстан

*E-mail: s.orazalieva@aes.kz

ЖЕЛДІҢ КРИТИКАЛЫҚ ЖЫЛДАМДЫҒЫ КЕЗІНДЕ ЖЕЛ ГЕНЕРАТОРЫНЫҢ РОТОРЫН АВТОМАТТЫ ТҮСІРУДІҢ ЖАЛПЫ ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа. Мақалада желдің күшті жүктемелерінен қорғау үшін жел генераторының роторын автоматты түрде түсіру жүйесін әзірлеудің жалпы тұжырымдамасы берілген. Жел турбинасының жұмысын автоматтандыру және оңтайландыру саласындағы заманауи зерттеулер айтарлықтай прогресті көрсетеді. Мақалада турбинаның тиімділігі мен тұрақтылығын жақсарту үшін адаптивті және болжамды басқару әдістерінің маңыздылығы және іске асыру мәселелері бойынша бірталай ғалымдардың еңбектеріне шолу жасалған. Аталған жетістіктер жел қондырғыларының тиімділігі мен сенімділігін арттыру үшін, оларды енгізу үшін айтарлықтай теориялық және тәжірибелік күш-жігерді қажет ететініне қарамастан, озық технологияларды енгізудің маңыздылығын көрсетеді. Сондай-ақ, қатты жел жүктемелерінде жел қондырғыларын түсіруге арналған сызықтық жетекті басқару жүйесін жасау үшін әртүрлі компоненттер зерттелді және талданды.

Негізгі назар анемометр, PID-реттегіші, жиілік түрлендіргіші және сызықтық жетек сияқты жүйенің негізгі құрамдас бөліктерінің сипаттамасына, сондай-ақ олардың математикалық модель шеңберіндегі өзара әрекеттестігіне аударылады. Қатты жел жағдайында жел генераторының роторын төмендету үшін PID-реттегішін қолданатын автоматты басқару жүйесінің сұлбасына талдау жасалады. Басқару жүйесін оңтайлы параметрлерге келтіру үшін жел жылдамдығының критикалық мәні энергетикалық әдіс арқылы есептелінеді. Желдің критикалық жылдамдығының есебі бойынша қорғаныс жүйесі іске қосылады. Басқару жүйесінің барлық компоненттерді тұйықталған басқару контуры бар бір жүйеге біріктіру, жел генераторының тұрақты және сенімді жұмысын қамтамасыз етеді, зақымдану қаупін азайтады және өнімділікті оңтайландырады. Ұсынылған тұжырымдама жел генераторларының сенімділігі мен тиімділігін арттыруға бағытталған толық шешімдерді одан әрі зерттеу және әзірлеу үшін негіз болады.

Түйін сөздер: PID-реттегіш, анемометр, жиілік түрлендіргіші, сызықтық жетек, жел генераторлары.

Кіріспе.

Заманауи экологиялық мәселелер мен энергия қажеттіліктері жел энергиясы маңызды рөл атқаратын жаңартылатын көздердің дамуын ынталандырады. Дегенмен, экстремалды ауа-райы жағдайларынан туындаған жел турбиналарының істен шығуының көбеюі жаңа шешімдерді талап етеді. Мысалы, 2000-2017 жылдар аралығында мұндай жағдайлардың

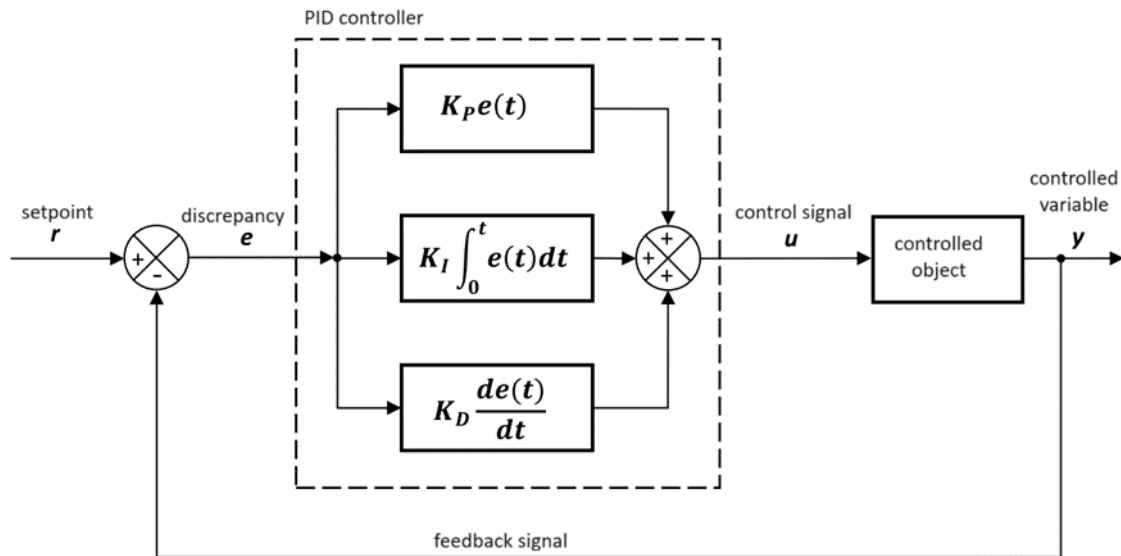
саны жылына 57-ден 167-ге дейін өсті [1]. Негізгі себептерге қалақшалардың зақымдануына және басқару жүйесінің істен шығуына әкелетін күшті желдің екпіні жатады. Қалақшалардағы жарықшақтардың жиілігі оның ұштарында 77,78% және ортаңғы бөлігінде 22,22% жетеді. Жел қондырғыларына техникалық қызмет көрсету олардың жалпы өнімділігінің 20-25%-ын құрауы мүмкін [3]. Ақауларды азайту үшін композиттер және жүктемені белсенді бақылау жүйелері сияқты, жаңа материалдар мен технологиялар қолданылады. Бұл тәсілдер құрылымдардың беріктігін арттырады және оларды экстремалды жағдайларда зақымданудан қорғайды [4]. Онипко роторы желдің төмен жылдамдығында жоғары тиімділігімен ерекшеленеді, 0,1 м/с жылдамдықпен жұмыс істей бастайды, бұл дәстүрлі жел генераторларына қарағанда айтарлықтай төмен. Алайда оның айтарлықтай салмағы мен төмен айналу жылдамдығы оны қатты желге осал етеді [5]. Сенімділікті арттыру үшін желдің критикалық жылдамдығы кезінде роторды автоматты түрде түсіру жүйесі ұсынылған [9]. Бұл шара бұзылу қаупін азайтады, жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзартады және техникалық қызмет көрсету шығындарын азайтады. Жобаның экологиялық маңыздылығы айқын. Жаңартылатын энергияны пайдалану CO₂ шығарындыларын (выбросы) азайтады, ал сенімділікті жақсарту жабдықты өндіру мен жөндеу кезіндегі экологиялық шығындарды азайтады [6]. Басқару жүйесі БС-тың экологиялық стандарттарына сәйкес келеді және жаңартылатын энергия саласындағы мемлекеттік бастамалармен қолдау көрсетіледі. Осылайша, Онипко роторын автоматты басқару сенімділікті арттырады, шығындарды азайтады және жаңартылатын энергияның тұрақты дамуына ықпал ете отырып, тұрақты энергия өндіруді қамтамасыз етеді.

Жел турбинасының жұмысын автоматтандыру және оңтайландыру саласындағы заманауи зерттеулер айтарлықтай прогресті көрсетеді. Назарбаев Университетінде қалақшалардың аэроқұрылымдық оңтайландыруы жүргізілді, ол қолданылатын технологияларды біріктірудің күрделілігіне қарамастан өнімділіктің 6,78%-ға өсуін және салмағының 4,22%-ға төмендеуін қамтамасыз етті. Қалқымалы жел турбиналары үшін дәлдік пен тұрақтылық бойынша дәстүрлі PID реттегіштерінен асып түсетін болжамды басқару (MPC) жүйесі ұсынылады, бірақ жоғары дәлдіктегі модельдер мен маңызды есептеу ресурстарын қажет етеді [7]. Турбинаның тиімділігі мен тұрақтылығын жақсарту үшін адаптивті және болжамды басқару әдістерінің маңыздылығы *Energies* журналында атап өтілген, бірақ іске асыру қиындықтары мен жоғары есептеу жүктемесі шектеуші факторлар болып қала береді. *Fluids*-та зерттеу ресурсты көп қажет ететініне қарамастан, ағынның әрекетін дәл болжауға мүмкіндік беретін тік осьтік турбинаның (VAWTs) қалақшаларының аэродинамикасын талдау үшін LES модельдеуінің артықшылықтарын көрсетеді [8]. DOE әдісімен қалақшаның дизайнын оңтайландыру VAWTs қуат коэффициентін 22,8%-ға арттырды, бірақ күрделі баптау кеңінен қолдануды шектейді [9]. *Sustainability*-да, бөлшектердің шоғырын оңтайландыруды және тіректі векторлық регрессияны қоса алғанда, машиналық оқыту әдістерін қолдану есебінде шығындарды азайтатын және сенімділікті арттыратын датчиктерсіз басқару әдісі сипатталады [10]. Бұл жетістіктер жел қондырғыларының тиімділігі мен сенімділігін арттыру үшін, оларды енгізу үшін айтарлықтай теориялық және тәжірибелік күш-жігерді қажет ететініне қарамастан, озық технологияларды енгізудің маңыздылығын растайды.

Зерттеу материалдары мен әдістері.

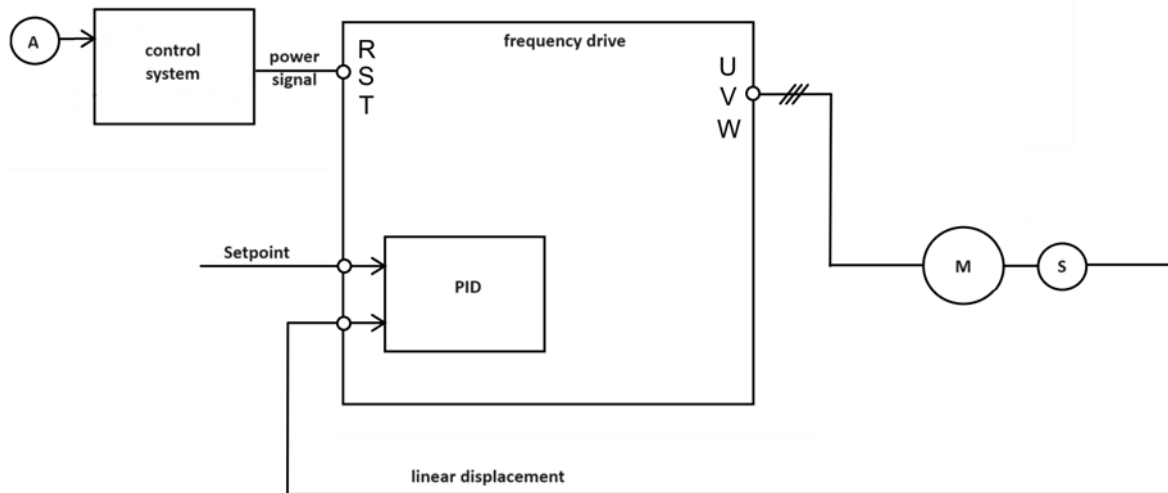
Қатты жел жүктемелерінде жел қондырғыларын түсіруге арналған сызықтық жетекті басқару жүйесін жасау үшін әртүрлі компоненттер зерттелді және талданды. Бұл бөлімде PID-реттегішінің жұмысының егжей-тегжейлері ұсынылды, оның мақсатты мәнін таңдаудың негіздемесі, таңдалған сызықтық жетектің сипаттамасы, жетектің математикалық моделі, сондай-ақ датчиктер мен жиілікті түрлендіргіштерді пайдалануды қоса алғандағы, жүйе интеграциясының ерекшеліктері келтірілген. PID-реттегіші (пропорционалды-интегралды-дифференциалды реттегіш) берілген нәтижеге жету үшін, орнатылған мән (Set Point) мен жүйенің ағымдағы күйі (Process Variable) арасындағы

айырмашылықты азайту арқылы, кері байланысы бар жүйені басқаруды жүзеге асырады [11]. 1 суретте PID-реттегішінің, контроллерінің жұмыс сұлбасы көрсетілген.



Сурет 1 – PID-реттегіші, контроллері [11]

2 суретте көрсетілген сұлба, қатты жел жағдайында жел генераторының роторын төмендету үшін PID-реттегішін қолданатын автоматты басқару жүйесі болып табылады. Жел жылдамдығының датчигі (А) ағымдағы жел жылдамдығын өлшейді және жел жылдамдығы белгіленген шекті мәннен асып кетсе, басқару жүйесін іске қосады. Мақсатты мән (SetPoint, SP) жүйенің қауіпсіздігі мен тиімділігіне қойылатын талаптар негізінде анықталатын, толық жетек жүрісінің 40% таңдалады. Бұл, берілген мәні мен жетектің ағымдағы жағдайы арасындағы айырмашылық ($e = r - y$) пропорционалды (K_P), интегралды (K_I) және дифференциалды (K_D) компоненттерінен тұратын PID контроллерінің кірісіне беріледі, олар басқару сигналын (u) ағымдағы қатге пропорционалды, жиналған қатге және қатенің өзгеру жылдамдығына сәйкес сәйкес түзетеді. Шығыс сигналдарының қосындысы, жел генераторының роторын төмендететін сызықтық жетекте әсер ететін басқару сигналын құрайды. Жетекке орнатылған сызықтық потенциометр, жетектің ағымдағы орнын өлшейді және бұл ақпаратты кері байланыс (linear displacement) ретінде жүйеге қайтарады. Жел күшті болған кезде контроллер, жел генераторының тұрақты және қауіпсіз жұмысын қамтамасыз ете отырып, оның айналу жылдамдығын қауіпсіз деңгейге дейін төмендету үшін, роторды төмендететін сызықтық жетекті іске қосатын басқару сигналын генерациялайды. Қауіпсіздік пен тиімділік арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз ету үшін SP мәні 40% таңдалады: ол желдің жоғары жылдамдықтарында жел генераторына желдің әсерін құрылымды толығымен түсіруді талап етпей жеткілікті түрде азайтуға мүмкіндік береді.



Сурет 2 – PID контроллеріне негізделген басқарудың жалпы сұлбасы

Мысал ретінде Оникко роторы бар жел генераторы (3 сурет) таңдалды, оның келесідей сипаттамалары бар: ротордың диаметрі 2 метр, ол 1 метр радиусқа сәйкес келеді. Ротор өтетін ауаның тығыздығы $1,225 \text{ кг/м}^3$, ал ротордың кедергі коэффициентінің мәні - 1. Осы ротормен байланысқан генератор 10 кВт-қа дейін қуат өндіруге қабілетті. Жел генераторы 0,1 м/с-тан басталатын жел жылдамдығының диапазонында жұмыс істейді және желдің жылдамдығы 5,6 м/с-тан аз болатын жағдайларда жұмыс істей алады, бұл жер бетінің көп бөлігін құрайды. Ротордың спиральды дизайны оның айналасында ауа жастықшасын жасайды, бұл жұмыс тиімділігін арттырады. Үлкен белсенді ротор аймағы минималды желмен максималды энергияны қамтамасыз етеді, ал қалақшаның ұзын беті желге ұшыраған үлкен аумақтың есебінде тиімділікті арттырады. Ротордың дизайны жасалудың жоғары дәлдігімен және дыбыссыз жұмыс істеуімен ерекшеленеді, бұл оны құстар үшін қауіпсіз етеді.



Сурет 3 – Оникко роторы бар жел генераторы [12]

Басқару жүйесін оңтайлы параметрлерге келтіру үшін жел жылдамдығының критикалық мәнін анықтау қажет. Күшті жел кезінде Оникко жел генераторлары роторын түсіру жүйесінің жел жылдамдығын анықтау сенімді және қауіпсіз жұмысты қамтамасыз етудегі маңызды қадамы болып табылады. Желдің критикалық жылдамдығы - жел

генераторы шамадан тыс жүктеме салдарынан зақымдалуы немесе тұрақсыз жұмыс істеуі мүмкін, шекті жылдамдық. Бұл шама жабдықты механикалық зақымданудан қорғау, оның қызмет ету мерзімін ұзарту, төтенше жағдайлардың қаупін азайту, адамдар мен қоршаған ортаның қауіпсіздігін қамтамасыз ету, генератордың тиімділігін қолдау, мәжбүрлі өшіруді болдырмау және энергия шығындарын азайту үшін қажет. Желдің критикалық жылдамдығын дәл анықтау жөндеу және техникалық қызмет көрсету шығындарын азайтуға, тоқтап қалу салдарынан табыстың жоғалуын болдырмауға және тұтастай алғанда жүйенің сенімділігі мен тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Жел жылдамдығының критикалық мәнін есептеу үшін энергетикалық әдіс қолданылды. Алдымен роторға түсетін желдің күшін есептейік.

Жел қуатын P_{wind} ауа ағынының кинетикалық энергиясы арқылы көрсетуге болады [13]:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

мұндағы:

A — ротордың көлденең қимасының ауданы,

ρ — ауаның тығыздығы,

v — жел жылдамдығы.

Ротордың көлденең қимасының ауданы анықталды:

$$A = \pi r^2 = 3.14 m^2 \quad (2)$$

P_{gen} генераторының қуаты C_p қуатты пайдалану коэффициенті арқылы жел қуатымен байланысқан, ол әдетте зерттелетін жел генераторының түрі үшін шамамен 0,4 болады:

$$P_{gen} = C_p P_{wind} \quad (3)$$

Демек, жел қуаты:

$$P_{wind} = \frac{P_{gen}}{C_p} \quad (4)$$

Мәндерді қоя келе, жел қуаты келесідей болып табылды:

$$P_{wind} = \frac{10 kW}{0.4} = 25 kW \quad (5)$$

Содан кейін желдің жылдамдығы, жел қуатын есептеуге арналған өрнек арқылы есептелді:

$$25 \times 10^3 = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 3.14 \cdot v^3$$

v^3 теңдеуін шешу арқылы желдің критикалық жылдамдығының мәні табылды:

$$v = \sqrt[3]{13000} \approx 23,5 m/s$$

Содан кейін осы жылдамдықта, жел күші F есептелді:

$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_d = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 552,25 \cdot 3,14 \approx 1058,65 H$$

Энергетикалық тәсіл мен жел генераторының сипаттамалары негізінде желдің критикалық күші мен жылдамдығын анықтау үшін есептеулер жүргізілді. 10 кВт генератор қуаты мен $Cp \approx 0,4$ қуатты пайдалану коэффициентіне сүйене отырып, роторға түсетін жел қуаты 25 кВт құрайды. Берілген жел қуаты үшін желдің болжамды жылдамдығы шамамен 23,5 м/с құрайды. Бұл жылдамдықта роторға әсер ететін жел күші шамамен 1058,65 Н құрайды. Осылайша, роторды түсіру жүйесін іске қосу қажет желдің критикалық күші шамамен 1058,65 Н құрайды, бұл қателер мен қосымша факторларды ескере отырып, 1200 Н қажетті мәнге жақын. Бұл шамамен 25 м/с желдің мақсатты критикалық жылдамдығы жел генераторын қорғау жүйесінің берілген параметрлеріне сәйкес келетінін растайды.

Нәтижелер және оларды талқылау.

Бұл бөлімде анемометр, PI-реттегіші, жиілік түрлендіргіші және сызықтық жетек сияқты әртүрлі компоненттердің өзара әрекеттесуіне негізделген басқару жүйесінің математикалық моделі ұсынылған. Бұл компоненттердің әрқайсысы жүйенің толық моделін құруға және процесті тиімді басқаруды қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін дифференциалдық теңдеулермен сипатталады.

Жел жылдамдығын өлшеу және бұл деректерді басқару жүйесіне жіберу үшін анемометр қолданылады. Ол маңызды рөл атқарады, өйткені жел жылдамдығын дәл өлшеусіз, жүйені дұрыс басқару мүмкін емес. Анемометрдің математикалық моделі бірінші ретті сызықтық дифференциалдық теңдеумен берілген:

$$\tau_a \frac{dV_a(t)}{dt} + V_a(t) = K_a V_w(t) \quad (7)$$

мұндағы, $\tau_a = 0.1s$ – анемометрдің уақыт тұрақтысы;

$V_a(t)$ – t уақытындағы анемометрдің шығыс кернеуі;

$K_a = 2$ В/(м/с) – жел жылдамдығын кернеуге түрлендіру коэффициентіне;

$V_w(t)$ – t уақытындағы жел жылдамдығы.

Содан кейін 7 теңдеуден Лаплас түрлендіруі орындалды:

$$\tau_a s V_a(s) + V_a(s) = K_a V_w(s) \quad (8)$$

8 теңдеуді $V_a(s)$ қатысты шешіп, біз мынаны алдық:

$$V_a(s) = \frac{K_a}{\tau_a s + 1} V_w(s) \quad (9)$$

Лапласстың кері түрлендіруі уақыт аймағындағы шешімін береді:

$$V_a(t) = K_a V_w(t) (1 - e^{-t/\tau_a}) \quad (10)$$

PI-реттегішін іске асыратын контроллер, реттеу қатесі негізінде басқару сигналын түзетеді. PI-реттегіші ең жақсы басқаруға қол жеткізу үшін пропорционалды және интегралды әрекеттерді біріктіреді. Лаплас аймағында PI-реттегішінің теңдеуі келесідей көрінеді [14]:

$$U(s) = k_p E(s) + \frac{k_i}{s} E(s) \quad (11)$$

мұндағы, k_p – пропорционалды коэффициент;

k_i – интегралдық коэффициент;

$E(s)$ – Лаплас аймағында басқару қатесі

$$E(s) = R(s) - Y(s) \quad (12)$$

мұндағы, $R(s)$ – берілген мән;

$Y(s)$ – жүйенің шығысы.

Уақыт аймағында PI-контроллерінің теңдеуі болып табылады:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (13)$$

мұндағы, $u(t)$ — t уақыт моментіндегі басқару сигналы;
 $e(t)$ — реттеу қатесі.

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (14)$$

мұндағы, $r(t)$ — берілген мән;
 $y(t)$ — жүйенің шығысы.

Жжиілік түрлендіргіші жиілікті, демек, сызықтық жетектің жылдамдығын басқарады. Ол біркелкі және дәл басқаруды қамтамасыз ететін жетек қозғалысын дәл бақылауға, басқаруға мүмкіндік береді. Жиілік түрлендіргіш моделі келесі дифференциалдық теңдеумен сипатталады:

$$\tau_f \frac{dF(t)}{dt} + F(t) = K_f U(t) \quad (15)$$

мұндағы, $\tau_f = 0.2s$ – жиілік түрлендіргішінің уақыт тұрақтысы;
 $F(t)$ – t уақыт моментіндегі түрлендіргіштің шығыс жиілігі;
 $K_f = 50$ Гц/В – кернеуді жиілікке түрлендіру коэффициенті;
 $U(t)$ – t уақыт моментіндегі контроллерден басқару кернеуі.

Лаплас түрлендіруінен кейін келесі теңдеу алынды:

$$\tau_f s F(s) + F(s) = k_f U(s) \quad (16)$$

Салыстырмалы түрде шешім қабылдай отырып, $F(s)$:

$$F(s) = \frac{K_f}{\tau_f s + 1} U(s) \quad (17)$$

Лапласстың кері түрлендіруі уақыт аймағының шешімін береді:

$$F(t) = K_f U(t) (1 - e^{-t/\tau_f}) \quad (18)$$

Сызықтық жетек жел генераторы роторының физикалық қозғалысына жауап береді, зақымдануды болдырмау және өнімділікті оңтайландыру үшін жел жылдамдығына байланысты оның орнын бейімдейді. Сызықтық жетектің динамикасы екінші дифференциалдық теңдеумен сипатталады [15]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = F(t) \quad (19)$$

мұндағы:

$m=10$ кг — жетек массасы.

$c=50$ Н·с/м — демпферлік коэффициент.

$k=200$ Н/м — серіппенің қаттылығы.

$y(t)$ — t уақыт моментіндегі жетектің орын ауыстыруы.

$F(t)$ — t уақыт моментінде жетекке түсірілген күш.

19 теңдеудің Лаплас түрлендіруі келесідей болады:

$$ms^2 Y(s) + cs Y(s) + kY(s) = F(s) \quad (20)$$

$Y(s)$ үшін салыстырмалы түрде шешіп, келесі теңдеу алынды:

$$Y(s) = \frac{F(s)}{ms^2 + cs + k} \quad (21)$$

Лапластың кері түрлендіруі [38] уақыт аймағындағы шешімін береді:

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{F(s)}{ms^2 + cs + k} \right\} \quad (22)$$

Потенциометр сызықтық жетектің ағымдағы жағдайын өлшеу және басқару жүйесінде кері байланысты қамтамасыз ету үшін қолданылады. Потенциометр моделі сызықтық теңдеумен сипатталады:

$$V_p(t) = K_p y(t) \quad (23)$$

мұндағы, $V_p(t)$ - t уақыт моментіндегі потенциалдың шығыс кернеуі;

$K_p = 0.5$ В/м – орын ауыстыруды кернеуге түрлендіру коэффициентіне;

$y(t)$ – t уақыт моментіндегі сызықтық жетектің орын ауыстыруы.

Әрі қарай, басқару жүйесінің толық моделін құру үшін барлық дифференциалдық теңдеулер біріктірілді. Ол үшін компоненттер арасындағы байланысты олардың шығыс және кіріс көрсеткіштері арқылы қарастырайық. Жел жылдамдығы $V_w(t)$ анемометрмен өлшенеді, ол оны шығыс кернеуге $V_a(t)$ түрлендіреді. Бұл кернеу, $E(t)$ реттеу қатесі негізінде басқару сигналын $U(t)$ есептейтін ПІ контроллеріне келіп түседі. Басқару кернеуі $U(t)$ жиілікті түрлендіргішке беріледі, ол берілген сигналға сәйкес $F(t)$ жиілігін өзгертеді. Жиілік сызықтық жетекке түсетін күшті анықтайды. Сызықтық жетек өз кезегінде роторды $y(t)$ қашықтыққа жылжытады, ол потенциалмен өлшенеді. Потенциометр орын ауыстыруды $V_p(t)$ шығыс кернеуіне түрлендіреді, ол ротордың ағымдағы жағдайына негізделген басқару сигналын реттеу үшін контроллерге кері беріледі, осылайша тұйықталған басқару контурын қамтамасыз етеді. Әрбір компоненттің математикалық модельдерінің теңдеулерін біріктіру арқылы жүйенің толық теңдеуі алынды:

$$Y(s) = \frac{k_f \left(k_p (R(s) - Y(s)) + \frac{k_I}{s} (R(s) - Y(s)) \right)}{(\tau_f s + 1)(ms^2 + cs + k)} \quad (24)$$

Жел генераторын басқару жүйесінің ұсынылған математикалық моделі жүйенің тиімді жұмысы мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін дәл өлшеу және көрсеткіштерді дұрыс басқару маңыздылығын көрсетеді. Анемометр, ПІ-контроллері, жиілік түрлендіргіші және сызықтық жетек арасындағы өзара әрекеттесуді модельдеу процесті дәл баптауға, реттеуге және басқаруға мүмкіндік береді. Барлық компоненттерді тұйықталған басқару контуры бар бір жүйеге біріктіру, жел генераторының тұрақты және сенімді жұмысын қамтамасыз етеді, зақымдану қаупін азайтады және өнімділікті оңтайландырады.

Қорытынды.

Бұл мақалада жел генераторы роторын қатты жел жүктемелері кезінде автоматты түрде түсіруге бағытталған басқару жүйесінің жалпы тұжырымдамасы берілген. Жүргізілген есептеулер ұсынылған модельдің тиімділігін растады және қорғаныс жүйесі іске қосылған жел жылдамдығының критикалық мәнін анықтауға мүмкіндік берді. Желдің критикалық жылдамдығы 23,5 м/с болатыны анықталды, бұл роторға шамамен 1058,65 Н күштің әсеріне сәйкес келеді. Бұл көрсеткіштер жабдықты механикалық зақымданудан қорғауды қамтамасыз етеді, жұмыс сенімділігін арттырады және қондырғының қызмет ету мерзімін ұзартады. Ұсынылған тұжырымдама тәжірибелік тексеруді және инженерлік шешімдерді әзірлеуді қоса алғанда, одан әрі зерттеулерге негіз болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Тянь К., Сон, Л., Чен Ю., Цзяо Х., Фэн Р., Тянь Р. (2022). Қатты жел кезінде жел турбинасы қалақтарының кернеулі муфталарын талдау және ақаулардың зақымдануын бағалау. Энергия 15(2), с. 464. DOI: 10.3390/en15020464
2. Сю Л., Юань Ю., Ван Дж., Ли Х. (2021). Жел турбинасы қалақтарының зақымдануын жан-жақты талдау. Энергия 14(20), с. 6768. DOI: 10.3390/en14206768
3. Чжан Т., Ван Ю., Лю З., Сун Х., Ли Дж. (2023). Жел турбинасы жабдықтарының істен шығуын талдау және интеллектуалды пайдалану пд техникалық қызмет көрсетуді зерттеу. Тұрақтылық, 15(10), с. 8333. DOI: 10.3390/su15108333
4. Ким Х., Ли Дж., Пак С., Чо Г., Чой М. (2022). Жел турбинасы қалақтарының істен шығуының негізгі себептері мен механизмдері: Шолу. Материалдар, 15(9), с. 2959. DOI: 10.3390/ma15092959
5. Браун, Р., Смит, К., Джонс, П., Уилсон, А. (2021). Жел турбинасы компоненттерінің істен шығу режимдеріне шолу. Энергия, 14(17), с. 5241. <https://doi.org/10.3390/en14175241>
6. Миллер Д., Томпсон Б., Джонсон С., Мартинес Р. (2021). Жел энергиясын пайдалану мен техникалық қызмет көрсетудегі жаңа тенденциялар. Қолданбалы ғылымдар, 11(4), с. 1386. DOI: 10.3390 / app11041386
7. Фазылова А., Илиев Т. А. (2022) Жел генераторының қалақтарының жаңа түрі механикалық автоматты басқару жүйесі. Байланыс, ақпараттық, электронды және энергетикалық жүйелер бойынша халықаралық конференция, CIEES 2022 – Конференция материалдары.
8. Ли Х., Чжан Ю., Ван К., Чжоу Т. (2022). Жел турбиналарының жағдайын бақылау жүйесін жобалау. Энергия, 15(2), с. 464. DOI: 10.3390/en15020464
9. Андерсен П., Педерсен Л., Хансен Дж., Кристенсен М. (2017). Жел турбинасының қалақтарына арналған материалдар: Шолу. Материалдар, 10(11), с. 1285. DOI: 10.3390/ma10111285
10. Уилсон Дж., Митчелл А., Томпсон Д., Грин С. (2021). Жел турбиналарының планетарлық берілістерінің істен шығуын талдау. Энергия, 14(20), с. 6768. DOI: 10.3390/en14206768
11. Тейлор Р., Уилсон М., Джонсон Б., Браун Т. (2021). Жел турбинасындағы апаттар туралы онжылдық жаңалықтарды тақырыптық модельдеу арқылы талдау. Тұрақтылық, 13(22), с. 12757. DOI: 10.3390/su132212757
12. Ван Си-С., Чианг М. - Х. (2016). Кері байланысты сызықтық басқарумен екі дәрежелі еркіндік қозғалысын басқаруды қолданатын үлкен жел турбинасының қадамды басқарудың жаңа жүйесі. Энергия, 9 (10), с. 791. DOI: 10.3390/en9100791
13. Симани С. (2015). Жел турбиналары жүйелерін модельдеуге және басқарудың озық стратегияларына шолу. Энергия, 8 (12), 13395-13418. DOI: 10.3390/en81212374
14. Надими Э.С., Герп Дж. (2023). Арнайы шығарылым: жел турбиналары жүйелерін нақты уақыт режимінде бақылау және бақылау. Энергия, 13(22), с. 12757. DOI: 10.3390/su132212757
15. Батай С., Байдуллаева А., Чжао Ю., Вэй Д., Байғарина А., Сәрсенов Е., Шабдан Ю. (2024). Жел турбиналарының қалақтарын аэроқұрылымдық жобалауды оңтайландыру. Процестер, 12(1), 22. DOI: 10.3390/pr12010022

References

1. Tian K., Son, L., Chen Y., Jiao X., Feng R., Tian R. (2022). Stress coupling analysis and failure damage evaluation of wind turbine blades during strong winds. Energies 15(2), s. 464. DOI: 10.3390/en15020464
2. Xu L., Yuan Y., Wang J., Li H. (2021). A comprehensive analysis of wind turbine blade damage. Energies 14(20), s. 6768. DOI: 10.3390/en14206768

3. Zhang T., Wang Y., Liu Z., Sun H., Li J. (2023). Analysis of wind turbine equipment failure and intelligent operation and maintenance research. Sustainability, 15(10), s. 8333. DOI: 10.3390/su15108333
4. Kim H., Lee J., Park S., Cho G., Choi M. (2022). Root causes and mechanisms of failure of wind turbine blades: Overview. Materials, 15(9), s. 2959. DOI: 10.3390/ma15092959
5. Brown R., Smith K., Jones P., Wilson A. (2021). A review on failure modes of wind turbine components. Energies, 14(17), s. 5241. <https://doi.org/10.3390/en14175241>
6. Miller D., Thompson B., Johnson C., Martinez R. (2021). New tendencies in wind energy operation and maintenance. Applied Sciences, 11(4), s. 1386. DOI: 10.3390/app11041386
7. Fazylova A., Iliev T.A (2022) New type of wind generator blades mechanical automatic control system. International conference on communications, information, electronic and energy systems, CIEES 2022 – Proceedings.
8. Li X., Zhang Y., Wang Q., Zhou T. (2022). Design of a condition monitoring system for wind turbines. Energies, 15(2), s. 464. DOI: 10.3390/en15020464
9. Andersen P., Pedersen L., Hansen J., Kristensen M. (2017). Materials for wind turbine blades: An Overview. Materials, 10(11), s. 1285. DOI: 10.3390/ma10111285
10. Wilson J., Mitchell A., Thompson D., Green S. (2021). Failure analysis of wind turbine planetary gear. Energies, 14(20), s. 6768. DOI: 10.3390/en14206768
11. Taylor R., Wilson M., Johnson B., Brown T. (2021). Analyzing a decade of wind turbine accident news with topic modeling. Sustainability, 13(22), s. 12757. DOI: 10.3390/su132212757
12. Wang C.-S., Chiang M.-H. (2016). A novel pitch control system of a large wind turbine using two-degree-of-freedom motion control with feedback linearization control. Energies, 9(10), s. 791. DOI: 10.3390/en9100791
13. Simani S. (2015). Overview of modelling and advanced control strategies for wind turbine systems. Energies, 8(12), s. 13395-13418. DOI: 10.3390/en81212374
14. Nadimi E. S., Herp J. (2023). Special issue: real-time monitoring and control for wind turbine systems. Energies, 13(22), s. 12757. DOI: 10.3390/su132212757
15. Batay S., Baidullayeva A., Zhao Y., Wei D., Baigarina A., Sarsenov E., Shabdan Y. (2024). Aerostructural design optimization of wind turbine blades. Processes, 12(1), s. 22. DOI: 10.3390/pr12010022

РАЗРАБОТКА ОБЩЕЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПУСКАНИЯ РОТОРА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА ПРИ КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА

Аннотация. В статье представлена общая концепция разработки системы автоматического опускания ротора ветрогенератора для защиты от сильных ветровых нагрузок. Современные исследования в области автоматизации и оптимизации работы ветряных турбин показывают значительный прогресс. В статье представлен обзор работ ряда ученых по вопросам важности и реализации адаптивных и прогнозных методов управления для повышения эффективности и устойчивости турбины. Данные достижения подчеркивают важность внедрения передовых технологий для повышения эффективности и надежности ветроустановок, несмотря на то, что для их внедрения требуются значительные теоретические и практические усилия. Также были исследованы и проанализированы различные компоненты для разработки системы управления линейным приводом для разгрузки ветровых установок при сильных ветровых нагрузках. Основное внимание уделено описанию ключевых компонентов системы, таких как анемометр, PID-регулятор, частотный преобразователь и линейный привод, а также их взаимодействию в рамках математической модели.

Анализируется схема системы автоматического управления, использующей PID-регулятор для понижения Ротора ветрогенератора в условиях сильного ветра. Для приведения системы управления к оптимальным параметрам критическое значение

скорости ветра вычисляется энергетическим методом. Приводится расчет критической скорости ветра, при достижении которой активизируется система защиты. Объединение всех компонентов системы управления в единую систему с замкнутым контуром управления обеспечивает стабильную и надежную работу ветрогенератора, снижает риск повреждения и оптимизирует производительность.

Предложенная концепция служит основой для дальнейших исследований и разработки полноценных решений, направленных на повышение надежности и эффективности ветрогенераторов.

Ключевые слова: PID-регулятор, анемометр, частотный преобразователь, линейный привод, ветрогенератор.

DEVELOPMENT OF A GENERAL SYSTEM FOR AUTOMATIC LOWERING OF A WIND GENERATOR ROTOR AT CRITICAL WIND SPEED

Abstract. The article presents the general concept of developing a system for automatically lowering the rotor of a wind turbine to protect against strong wind loads. Modern research in the field of automation and optimization of wind turbines shows significant progress. The article provides an overview of the work of a number of scientists on the importance and implementation of adaptive and predictive control methods to improve turbine efficiency and stability. These achievements emphasize the importance of introducing advanced technologies to improve the efficiency and reliability of wind turbines, despite the fact that significant theoretical and practical efforts are required to implement them. Various components were also investigated and analyzed for the development of a linear actuator control system for unloading wind turbines under heavy wind loads. The main focus is on describing the key components of the system, such as an anemometer, a PID controller, a frequency converter, and a linear actuator, as well as their interaction within a mathematical model. The scheme of an automatic control system using a PID controller to lower the rotor of a wind turbine in high wind conditions is analyzed. To bring the control system to optimal parameters, the critical value of the wind speed is calculated using the energy method. The calculation of the critical wind speed is given, at which the protection system is activated. Combining all components of the control system into a single closed-loop control system ensures stable and reliable operation of the wind turbine, reduces the risk of damage and optimizes performance. The proposed concept serves as the basis for further research and development of full-fledged solutions aimed at improving the reliability and efficiency of wind turbines.

Key words: PID controller, anemometer, frequency converter, linear drive, wind generator.

Авторлар туралы мәлімет

Оразалиева Сандуғаш Құдайбергеновна	PhD, «Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАҚның «Электрондық инженерия» кафедрасының меңгерушісі, қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., Қазақстан E-mail: s.orazalieva@aes.kz
Фазылова Алина Ринатовна	PhD, «Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАҚның «Электрондық инженерия» кафедрасының аға оқытушысы, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: a.fazylova@aes.kz
Абдрешова Самал Бексултановна	PhD, «Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАҚның «Электрондық инженерия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., Қазақстан E-mail: s.abdrashova@aes.kz
Ырыскелдиев Бексултан Жанайұлы	Магистрант, «Халықаралық көлік гуманитарлық университеті» Алматы қ., Қазақстан, E-mail: yryskeldiev06@gmail.com

Сведение об авторах

Оразалиева Сандугаш Кудайбергеновна	PhD, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой Электронной инженерии, НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», г. Алматы, Казахстан, E-mail: s.orazalieva@aes.kz
Фазылова Алина Ринатовна	PhD, старший преподаватель кафедры Электронной инженерии, НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», г. Алматы, Казахстан, E-mail: a.fazylova@aes.kz
Абдрешова Самал Бексултановна	PhD, ассоциированный профессор кафедры Электронной инженерии, НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», г. Алматы, Казахстан, E-mail: s.abdreshova@aes.kz
Ырыскелдиев Бексултан Жанайулы	Магистрант, «Международный транспортно- гуманитарный университет» г. Алматы, Казахстан, E-mail: yryskeldiev06@gmail.com

Information about the authors

Orazalieva Sandugash Kudaibergenovna	PhD, Associate Professor, Head of the Department of Electronic Engineering, NAO "Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev", Almaty, Kazakhstan, E-mail: s.orazalieva@aes.kz
Fazylova Alina Rinatovna	PhD, Senior Lecturer, Department of Electronic Engineering, NAO "Almaty University of Power Engineering and Communications named after Gumarbek Daukeev", Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.fazylova@aes.kz
Abdreshova Samal Beksultanovna	PhD, Associate Professor, Department of Electronic Engineering, NAO "Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev", Almaty, Kazakhstan, E-mail: s.abdreshova@aes.kz
Yryskeldiev Beksultan Zhanayuly	Master's Student, «International University of Transport and Humanities» Almaty, Kazakhstan, E-mail: yryskeldiev06@gmail.com



УДК 53.088

МРНТИ 90.27.32

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_7

Б.Қ. Ермек^{1*}, Р.С. Беккожин², А. Әлиқызы¹, А.К.Шинбаева¹, Ж.Б. Омарова¹

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²ФАА РГП «КазСтандарт», Алматы, Казахстан

E-mail: ermekbakbergen1@bk.ru*

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ: СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ GUM И МОНТЕ-КАРЛО НА ПРИМЕРЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕРМОМЕТРА

Аннотация. В данной статье представлен сравнительный анализ методов оценки неопределенности GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) и Монте-Карло на примере калибровки биметаллического термометра ТБП 63-1 с диапазоном измерения от 0 до 120 °С и классом точности 2.5. Исследование направлено на идентификацию и на количественный анализ ключевых факторов неопределенности, включая как стохастические, так и систематические компоненты ошибок. Моделирование по методу GUM требует высокого уровня математических знаний для выполнения многих процедур, тогда как метод Монте-Карло может служить альтернативой для различных лабораторных исследований.

Математическая модель вводится для описания измеренной температуры, представленной как $E_x = V_c + \Delta V_c + \delta V_c$, где каждый компонент отражает соответствующий вклад в общую неопределенность: V_c – показания термометра, ΔV_c – поправка калибратора и δV_c – половина цены деления. Процесс анализа включает вычисление стандартной неопределенности типа A из серии измерений для оценки случайных колебаний, а стандартные неопределенности типа B оцениваются для систематических источников, предполагая равномерное и прямоугольное распределение ошибок. Суммарная стандартная неопределенность измерений интегрирована для получения расширенной неопределенности с коэффициентом охвата $k = 2$ и доверительной вероятностью 0.95. В рамках метода Монте-Карло было сгенерировано 1,000,000 симуляций для достижения статистической значимости. Результаты анализа представлены в виде окончательного значения температуры, скорректированного с учетом всех вычисленных неопределенностей.

Основная цель исследования — определить, какой из методов наиболее эффективен для данного типа измерительного оборудования и продемонстрировать простоту использования Microsoft Excel (или аналогичного программного обеспечения для работы с таблицами) для оценки неопределенности измерений, основанных на функциональной зависимости.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, GUM, биметаллический термометр, неопределенность, погрешность, Microsoft Excel.

Введение.

Актуальность темы данного исследования обусловлена стремлением научного и инженерного сообществ к повышению точности и надёжности метрологических измерений, что напрямую влияет на качество и конкурентоспособность технологических

процессов и продукции. В рамках данного исследования осуществляется анализ двух методологий оценки неопределенности: традиционного подхода, описанного в документе GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement), и статистического метода Монте-Карло [1].

Метод Монте-Карло, применяющий статистическое моделирование и случайный выбор данных, является инновационным подходом в оценке неопределенности [2]. Он эффективно обрабатывает множество переменных, предоставляя детальное осмысление неопределенностей в комплексных системах. В отличие от него, метод GUM, долгий период, считавшийся эталоном в этой сфере, опирается на более классические аналитические процедуры и включает в себя некоторые упрощения для оценки неопределенности [3]. Этот метод позволяет глубже понимать сложности и вариативность условий эксперимента, раскрывая не только очевидные, но и скрытые факторы влияния. Он особенно ценен в ситуациях, где традиционные методы оказываются ограниченными из-за сложности системы или нелинейности процессов. Метод Монте-Карло предлагает гибкость и адаптивность, которые необходимы для современных научных исследований.

Объектом исследования являются процессы и условия измерений, влияющие на точность и достоверность метрологических данных, а предметом исследования — методы оценки неопределенности измерений, в частности методы GUM и Монте-Карло [4]. Целью исследования является сравнительный анализ этих методов для определения их эффективности и применимости в различных условиях измерений. Задачами исследования стали оценка стандартных и расширенных неопределенностей измерений, идентификация и количественный анализ стохастических и систематических источников неопределенности

Методы исследования включают статистическое моделирование, количественный анализ, сравнительный анализ, использование специализированного программного обеспечения для обработки данных, что позволяет выполнить задачи на высоком уровне [5]. Гипотеза исследования предполагает, что метод Монте-Карло может обеспечить более глубокое понимание неопределенностей в условиях сложных систем по сравнению с методом GUM, особенно когда традиционные методы ограничены из-за сложности системы или нелинейности процессов [6].

Результаты данного исследования подтвердили, что выбор метода оценки неопределенности значительно влияет на точность измерений.

Материалы и методы.

В этом исследовании проводится анализ неопределенности измерений для биметаллического термометра ТБП 63, который является современным прибором для измерения температуры. Термометр обладает диапазоном измерений от 0 до 120 °С, а класс точности составляет 2,5.

Расчет неопределенности включает в себя следующие этапы: определение математической модели прибора, выявление источников неопределенности, оценка входных величин и их неопределенностей, анализ коррелированных и некоррелированных выходных величин, составление бюджета неопределенности, расчет суммарной стандартной неопределенности и расширенной неопределенности, а также представление конечного результата измерений.

Этап 1. Математическая модель

Математическая модель для расчета показаний биметаллического термометра ТБП 63-1 выражается уравнением:

$$E_x = V_c + \Delta V_c + \delta V_c \quad (1)$$

где V_c – показания термометра, °С.

Этап 2. Выявления источников неопределенности

На втором этапе расчёта неопределённости ключевым является выявление и анализ всех потенциальных источников неопределённости, которые могут влиять на результаты измерений.

Для термометра ТБП 63-1 источники неопределённости могут включать, но не ограничиваются следующими факторами:

ΔV_s – поправка калибратора при заданной температуре, °C;

δV_s – полови́на цены деления единицы младшего разряда дисплея, °C.

Этап 3. Оценивание входных величин и их неопределённости

На третьем этапе проводится оценка входных величин и их неопределённости. В данном случае расчет стандартной неопределённости выполняется по типу А, что включает учет источников неопределённости, имеющих случайный характер [7]. Для оценки неопределённости в условиях повторяемости были проведены десять измерений температуры с использованием калибруемого прибора. Полученные данные позволяют определить среднее значение измеряемой величины, а также рассчитать стандартное отклонение выборки, которое характеризует разброс измерений относительно среднего значения. Данный метод позволяет количественно оценить случайную составляющую неопределённости, вызванную вариациями в показаниях прибора, изменениями условий измерения и другими случайными факторами [8]. Стандартная неопределённость типа А вычисляется как стандартное отклонение выборки, деленное на квадратный корень из числа измерений.

Таблица 1 - Измеренное и среднее значение калибруемого прибора

№	Измеренное значение	Среднее значение
1	27	27,3
2	28	
3	27	
4	27	
5	27	
6	27	
7	28	
8	28	
9	27	
10	27	

Расчет среднего значения:

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n=10} x_k = \frac{27*7+28*3}{10} = 27,3 \text{ °C} \quad (2)$$

Расчет стандартной неопределённости по типу А высчитывается по формуле

$$u(x_i) = u_A(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_{cp})^2} \quad (3)$$

Подставляя все значения получим:

$$u(x_i) = u_A(x_i) \sqrt{\frac{(27-27,3)^2+(28-27,3)^2+\dots+(27-27,3)^2}{10*(10-1)}} = 0,01610 \approx 0,02 \text{ °C} \quad (4)$$

В данном случае в типе В вычисляются стандартные неопределённости, вызванные различными источниками систематических погрешностей, которые возникают из-за характеристик измерительных приборов, эталонов и методов измерения. В отличие от неопределённости типа А, которая связана со случайными изменениями в процессе измерений и оценивается с помощью статистических методов, неопределённость типа В основывается на известных данных о характеристиках оборудования и принимается аналитически [9].

Для оценки неопределённости необходимо учитывать распределение возможных отклонений измеряемых величин. В данном случае принимается, что для эталонного

прибора неопределённость распределяется равномерно, так как его погрешность имеет предсказуемый характер и не зависит от случайных факторов. Такой подход применяется в тех случаях, когда прибор имеет заданные пределы точности, а возможные отклонения в его показаниях не подвержены.

Для калибруемого прибора неопределённость распределяется по прямоугольному закону, поскольку измеренное значение может изменяться в пределах установленной погрешности, но не имеет при этом явной тенденции к какому-либо конкретному значению внутри этого диапазона. Такой метод оценки применяется, когда невозможно определить, какие именно значения измеряемой величины встречаются чаще, и когда прибор ограничен фиксированной ценой деления, не позволяющей отобразить изменения с более высокой точностью.

Основными источниками систематической неопределённости в данном случае являются поправка калибратора и ограниченная точность шкалы измерительного прибора. Поправка калибратора отражает возможные отклонения эталонного прибора от истинного значения температуры, что учитывается в расчётах, исходя из известных характеристик прибора. Ограниченная точность шкалы измерительного прибора связана с тем, что дисплей или аналоговая шкала прибора могут отображать значения с определённой дискретностью, что накладывает ограничения на точность измерений и приводит к дополнительной неопределённости.

Результаты расчётов показывают, что наибольший вклад в суммарную неопределённость вносит именно ограниченная точность шкалы прибора [10]. Кроме того, использование эталонов с минимальными погрешностями позволяет улучшить качество измерений и уменьшить влияние систематических ошибок, что особенно важно в задачах, требующих высокой точности и воспроизводимости результатов.

Таблица 2 - Источники неопределенности, имеющие систематический характер

	Входная величина	Неопр. по типу В
Стандартная неопределенность от ΔV_s , °C, $U_b = a/(\sqrt{3})$	0,05	0,02887
Стандартная неопределенность от δV_a , °C, $U_b = a/(2\sqrt{3})$	2	0,57735

Этап 4. Некоррелированные выходные величины

На этом этапе проводится анализ взаимосвязи между различными источниками неопределенности. В данном случае принимается важное допущение, что все входные величины не коррелируют друг с другом. Это означает, что каждая составляющая неопределенности влияет на конечный результат независимо от других, и между ними отсутствует какая-либо статистическая зависимость.

Принятие данного допущения значительно упрощает процесс расчета суммарной неопределенности, так как позволяет использовать метод квадратичного сложения отдельных неопределённостей. Если входные величины действительно независимы, их вклад в общую неопределённость можно определить по следующему принципу: каждая отдельная составляющая неопределенности сначала возводится в квадрат, затем их сумма извлекается из-под квадратного корня, что дает итоговую оценку общей неопределённости измерений.

При наличии корреляции между величинами процедура расчета усложняется, так как появляется необходимость учитывать коэффициенты корреляции, которые показывают степень взаимосвязи между различными неопределенностями. В таком случае неопределенности уже не могут складываться простым способом, а необходимо учитывать их взаимное влияние, что требует применения более сложных математических методов. Однако в данном расчёте предполагается, что корреляции между неопределёнными источниками отсутствуют, а все источники неопределённости действуют независимо друг от друга.

Таким образом, на данном этапе расчёта неопределённости используется метод некоррелированных величин, который позволяет правильно учесть вклад каждой составляющей в суммарную неопределённость [11]. Это упрощает вычисления и делает итоговую оценку неопределённости измерений более прозрачной и объективной, что особенно важно при проведении метрологических исследований и разработке методик измерений.

Этап 5. Составление бюджета неопределённости

На данном этапе составляется бюджет неопределённости, который представляет собой систематизированный анализ всех выявленных источников ошибок, влияющих на конечный результат измерений. В бюджет включаются как случайные, так и систематические неопределённости, а их количественная оценка проводится с учетом характера возникновения, типа распределения и коэффициента чувствительности. Основная цель данного этапа – определить вклад каждого источника неопределённости и обоснованно рассчитать совокупную неопределённость измерений [12].

Каждый источник неопределённости анализируется по нескольким ключевым параметрам. В первую очередь учитывается входная величина, то есть физический параметр, который может изменяться и вносить вклад в общую неопределённость. Далее определяется числовое значение этого параметра, а также уточняется тип неопределённости – случайный или систематический. Случайные отклонения относятся к неопределённости типа А и определяются на основе статистической обработки повторных измерений, в то время как систематические отклонения относятся к типу В и оцениваются по характеристикам измерительного прибора и эталонов [13].

Важным фактором является учет вида распределения неопределённости, поскольку от этого зависит метод ее расчета. Вид распределения определяется исходя из природы возникновения неопределённости и характеристик измерительных средств.

Следующим этапом анализа является расчет стандартной неопределённости, которая отражает разброс значений вокруг среднего результата. Для каждой входной величины вычисляется ее стандартное отклонение, которое затем корректируется с учетом коэффициента чувствительности. Этот коэффициент показывает, насколько изменение конкретного параметра влияет на конечное значение измеряемой величины. Например, если небольшое изменение одного из источников неопределённости приводит к значительному изменению результата измерения, его коэффициент чувствительности будет высоким.

После того как все неопределённости рассчитаны и откорректированы, их вклад в общую неопределённость определяется путем перемножения стандартной неопределённости на коэффициент чувствительности. Итоговый бюджет неопределённости представляет собой совокупность всех этих данных и позволяет объективно оценить, какие факторы оказывают наибольшее влияние на точность измерений. Анализируя бюджет неопределённости, можно определить, какие из источников ошибок являются доминирующими и требуют дополнительного контроля или уменьшения их влияния.

Таблица 3 – Составление бюджета неопределённости

Входная величина, °С	Значение входной величины	Отклонение оценок	Тип неопределённости	Вид распределения	Стандартная неопределённость	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределённость
X_i	x_i	\pm			U_{ci}	C_i	$U_{ci} * C_i$
Ускок	27,3	-	А	нормальное	0,02	1	0,02

ΔV_s	0,05		В	прямоуголь ное	0,03	1	0,03
δV_a	2		В	прямоуголь ное	0,6	1	0,6

Этап 6. Расчет суммарной неопределенности

На данном этапе проводится расчет суммарной стандартной неопределенности, который является одним из ключевых этапов оценки точности измерений. Основная идея заключается в том, что общая неопределенность измерения определяется не простой суммой всех составляющих неопределенности, а методом квадратичного суммирования, поскольку каждая из них вносит свой независимый вклад в итоговый результат.

При вычислении суммарной неопределенности используется принцип суперпозиции, согласно которому суммарная стандартная неопределенность рассчитывается как квадратный корень из суммы квадратов всех индивидуальных стандартных неопределенностей. Данный метод применяется в тех случаях, когда неопределенности имеют разные источники происхождения и не зависят друг от друга [14].

Важно отметить, что в данном случае все входные величины считаются некоррелированными, что позволяет применять метод квадратичного суммирования без учета коэффициентов корреляции. Если бы между различными неопределенностями существовала зависимость, пришлось бы вводить дополнительные поправочные коэффициенты, отражающие взаимосвязь величин, что значительно усложнило бы расчет.

Каждая составляющая неопределенности, включенная в бюджет, вносит свой вклад в суммарную неопределенность. Это могут быть как случайные, так и систематические факторы, например, вариации измеренных значений в повторных испытаниях, неточность калибратора, погрешности шкалы прибора и другие. Их стандартные неопределенности были предварительно рассчитаны и приведены в бюджете неопределенности.

Применение метода квадратичного сложения обусловлено тем, что неопределенности представляют собой случайные и систематические величины, влияющие на итоговый результат измерения по-разному. Простое сложение этих величин дало бы завышенное значение общей неопределенности, поскольку в реальности влияние различных факторов не всегда накладывается линейно. Метод квадратного суммирования позволяет учесть относительное влияние каждой из составляющих и получить более точную оценку итоговой неопределенности.

После выполнения расчетов полученное значение стандартной суммарной неопределенности используется для дальнейшего определения расширенной неопределенности, которая учитывает доверительную вероятность измерений.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 u^2(x_i)}, \quad (5)$$

$$u_c(y) = \sqrt{0,02^2 + 0,03^2 + 0,6^2} = 0,601082 \approx 0,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6)$$

Этап 7. Расширенная неопределенность

На 7 этапе производится расчет расширенной неопределенности, которая представляет собой важный показатель точности измерений с учетом заданного уровня доверия. В отличие от стандартной неопределенности, которая характеризует среднеквадратичное отклонение измеряемой величины, расширенная неопределенность позволяет определить диапазон, в котором с высокой вероятностью находится истинное значение измеряемой величины.

Расширенная неопределенность рассчитывается путем умножения суммарной стандартной неопределенности на коэффициент охвата, который зависит от требуемого уровня доверия. В большинстве метрологических расчетов используется уровень доверия 95%, который является стандартным в научных исследованиях и измерительной практике. Для данного уровня доверия коэффициент охвата k принимается равным 2, что означает,

что истинное значение измеряемой величины с вероятностью 95% будет находиться в диапазоне, определяемом расширенной неопределенностью [15].

Использование коэффициента охвата необходимо, поскольку в реальных измерениях возможны случайные колебания результатов, и важно учитывать степень уверенности в том, что истинное значение находится в определенном интервале. Если бы использовалась только стандартная неопределенность, диапазон мог бы быть слишком узким, что не давало бы достаточной уверенности в точности измерений. Умножение на коэффициент охвата позволяет учесть возможные вариации измеряемой величины и задать разумные границы неопределенности.

Расчет расширенной неопределенности важен в ситуациях, когда необходимо представить измерения с четко определенной точностью, например, при сертификации оборудования, проведении метрологических экспертиз или разработке методик измерений. Значение расширенной неопределенности включается в конечный результат измерения, что позволяет пользователю данных интерпретировать точность и надежность полученных результатов.

$$U(y) = k \cdot u_c(y), \quad (7)$$

$$U(y) = 2 * 0,6 = 1,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

Этап 8. Представление конечного результата

Завершающий этап включает формулировку итоговых результатов измерений с учетом всех рассчитанных неопределенностей. Результат представляется в форме интервала доверия вокруг среднего значения, который указывает на возможные пределы отклонения от истинного значения. Это позволяет пользователям прибора принимать обоснованные решения, учитывая потенциальную неопределенность прибора. На рисунке 1 показан вклад в неопределенность.

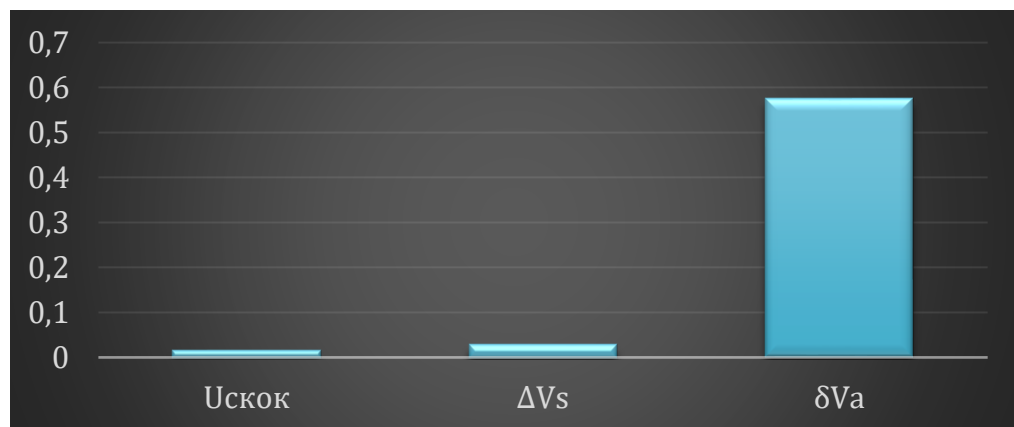


Рисунок 1 – Вклад в неопределенность

$$Y = y \pm U, P \quad (9)$$

$$(27,3 \pm 1,2) \text{ гПа, при } k = 2, P = 0,95. \quad (10)$$

Расчет неопределенности измерения по методу Монте-Карло

В процессе дальнейшего изучения точности измерений биметаллического барометра, мы применим метод Монте-Карло для оценки неопределенности.

Порядок оценивания расширенной неопределенности с использованием ММК и применением программного обеспечения Excel является наиболее удобным и легко осуществленным.

Он заключается в следующих операциях:

1. Формирование массивов данных

а) В соответствии с заданным законом распределения генерируются N массивов.

Создаются L массивов (по числу входных величин) случайных чисел объёмом $n = 1,000,000$, которые соответствуют указанным законам распределения. Для этого в программе Excel применяются соответствующие формулы.

Таблица 4 – Виды распределения и формулы

Распределение	Формула
Нормальное	=НОРМОБР (СЛЧИС (); x ; u)
Прямоугольное	
Заданная полуширина a	= $x+2*a*(СЛЧИС ()-0,5)$
Заданная стандартная неопределенность u	= $x+2*u*КОРЕНЬ (3) *(СЛЧИС ()-0,5)$
Треугольное	
Заданная полуширина a	= $x+a*(СЛЧИС ()-СЛЧИС ())$
Заданная стандартная неопределенность u	= $x+u*КОРЕНЬ (6) *(СЛЧИС ()-СЛЧИС ())$
Стьюдента	= $x+u*СТЬЮДРАСПОБР (СЛЧИС ());$

в которых необходимо заменить x – на значение входной величины, a – на заданную полуширину, u – на стандартную неопределённость, v – на число степеней свободы.

б) Формируют массив выходной величины, путем подстановки сгенерированных значений входных величин в модельное уравнение.

в) Упорядочивают от меньшего к большему (ранжируют) массив выходной величины.

Для расчета генерируем 3 массива случайных чисел (для входных V_c , ΔV_c и δV_c) объёмом $M=10^6$, подчиняющихся прямоугольному и нормальному закону распределения.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Математическая модель:			Ex = Vc+ΔVs+δVc			
2							
3	Vc	ΔVs	δVc	Ex			
4	27,3234	0,006394	1,555194	28,88499			
5	27,27187	0,098619	2,774044	30,14454			
6	27,29814	0,092498	1,397746	28,78838			
7	27,28188	0,013343	1,063621	28,35884			
8	27,30578	0,032685	2,876167	30,21463			
9	27,29937	0,024521	1,489164	28,81305			
10	27,30316	0,042915	2,243778	29,58986			
11	27,29565	0,022058	1,336694	28,6544			
12	27,31654	0,003158	1,164206	28,4839			
13	27,283	0,071314	1,350516	28,70483			
14	27,29609	0,051697	2,337142	29,68493			
15	27,29792	0,062312	1,967002	29,32723			
16	27,32484	0,008562	1,509626	28,84303			
17	27,28673	0,027322	1,236599	28,55065			
18	27,28764	0,023187	1,246084	28,55691			
19	27,30473	0,058255	1,178923	28,54191			
20	27,32397	0,061356	1,493263	28,87859			
21	27,31225	0,033105	2,809096	30,15445			
22	27,31405	0,088404	2,095386	29,49784			
23	27,30903	0,02251	2,521046	29,85259			
24	27,27464	0,005943	2,397416	29,678			
25	27,29805	0,012258	2,836265	30,14658			
26	27,30515	0,003894	2,176825	29,48587			
27	27,29616	0,022039	2,644608	29,96281			
28	27,31025	0,098077	2,849267	30,2576			
29	27,3014	0,06687	2,976936	30,34521			
30	27,29159	0,024627	2,43885	29,75506			

Рисунок 2- Массив входных данных

999971	27,30682	0,049159	2,670265	30,02625
999972	27,31634	0,089005	2,62945	30,0348
999973	27,29437	0,096177	1,344434	28,73498
999974	27,27155	0,006935	2,49943	29,77792
999975	27,27547	0,025822	2,042774	29,34407
999976	27,28647	0,065992	2,820612	30,17308
999977	27,28695	0,092037	1,016813	28,3958
999978	27,30572	0,044547	2,364718	29,71498
999979	27,27498	0,012212	2,361105	29,6483
999980	27,29129	0,034294	2,806093	30,13168
999981	27,29148	0,037899	2,939703	30,26909
999982	27,32923	0,029348	2,729232	30,08781
999983	27,30068	0,060163	2,391108	29,75195
999984	27,30028	0,008192	2,631854	29,94033
999985	27,27692	0,084424	2,766505	30,12785
999986	27,32758	0,051409	1,087685	28,46667
999987	27,2976	0,0229	1,294141	28,61464
999988	27,26725	0,086348	2,892104	30,2457
999989	27,29728	0,07344	2,841608	30,21233
999990	27,28974	0,080027	1,714488	29,08425
999991	27,31267	0,002194	2,719377	30,03424
999992	27,3052	0,00882	1,183304	28,49732
999993	27,31241	0,000232	1,020442	28,33308
999994	27,29987	0,047321	1,061657	28,40885
999995	27,3184	0,064703	1,946833	29,32994
999996	27,32152	0,068686	1,255739	28,64594
999997	27,31268	0,037854	2,41569	29,76622
999998	27,30822	0,082109	1,850576	29,24091
999999	27,33621	0,052291	2,538386	29,92688
1000000	27,30598	0,053669	1,642101	29,00175

Рисунок 3 – Массив входных данных

Данные с Лист1 переносятся на Лист2 и массив сортируется по возрастанию

	A	B	C	D	E
1	27,22696	-8,3E-07	1,000002	28,22696	
2	27,22794	-8,1E-07	1,000007	28,22795	
3	27,22876	-5,3E-07	1,000009	28,22877	
4	27,22929	-5E-07	1,000012	28,2293	
5	27,22946	-3,7E-07	1,000014	28,22947	
6	27,22975	-3,4E-07	1,000016	28,22977	
7	27,23006	-2,7E-07	1,000017	28,23008	
8	27,23151	4,07E-08	1,000018	28,23152	
9	27,2324	6,34E-08	1,000019	28,23242	
10	27,23244	7,05E-08	1,00002	28,23246	
11	27,2328	2,1E-07	1,000028	28,23283	
12	27,23281	3,28E-07	1,000028	28,23283	
13	27,23282	4,3E-07	1,000029	28,23285	
14	27,23352	6,35E-07	1,000031	28,23355	
15	27,23377	8,1E-07	1,000033	28,2338	
16	27,23433	8,26E-07	1,000035	28,23436	
17	27,23475	9,07E-07	1,000039	28,23479	
18	27,23488	1,02E-06	1,00004	28,23493	
19	27,23489	1,2E-06	1,000044	28,23494	
20	27,23496	1,22E-06	1,000044	28,23501	
21	27,23504	1,26E-06	1,000052	28,23509	
22	27,23507	1,33E-06	1,000052	28,23512	
23	27,23511	1,36E-06	1,000053	28,23517	
24	27,23521	1,4E-06	1,000055	28,23526	
25	27,23531	1,71E-06	1,000055	28,23537	
26	27,23547	1,83E-06	1,000056	28,23553	
27	27,23557	1,85E-06	1,000059	28,23564	
28	27,23576	1,88E-06	1,000061	28,23582	
29	27,23578	1,89E-06	1,000062	28,23584	
30	27,23588	1,92E-06	1,000062	28,23595	

Рисунок 4 – Массив входных данных

	A	B	C	D	E
999971	27,36501	0,099998	2,999939	30,46495	
999972	27,36515	0,099998	2,99994	30,46509	
999973	27,36532	0,099998	2,999941	30,46526	
999974	27,36535	0,099999	2,999948	30,4653	
999975	27,36539	0,099999	2,999949	30,46533	
999976	27,36585	0,099999	2,99995	30,4658	
999977	27,36595	0,099999	2,99995	30,4659	
999978	27,36602	0,099999	2,999952	30,46597	
999979	27,36618	0,099999	2,999954	30,46613	
999980	27,36624	0,099999	2,999958	30,4662	
999981	27,36627	0,099999	2,999958	30,46622	
999982	27,36638	0,099999	2,999959	30,46634	
999983	27,36657	0,099999	2,999962	30,46654	
999984	27,36713	0,099999	2,999967	30,46709	
999985	27,36724	0,1	2,999968	30,46721	
999986	27,36741	0,1	2,999969	30,46737	
999987	27,36846	0,1	2,99997	30,46843	
999988	27,3691	0,1	2,999974	30,46907	
999989	27,36933	0,1	2,999976	30,46931	
999990	27,36938	0,1	2,999979	30,46936	
999991	27,36955	0,1	2,999984	30,46953	
999992	27,36972	0,1	2,999985	30,46971	
999993	27,37012	0,1	2,999987	30,4701	
999994	27,3706	0,1	2,999988	30,47059	
999995	27,37141	0,1	2,999991	30,4714	
999996	27,37278	0,1	2,999992	30,47277	
999997	27,3731	0,100001	2,999994	30,47309	
999998	27,37386	0,100001	2,999995	30,47385	
999999	27,37538	0,100001	2,999995	30,47538	
1000000	27,37938	0,100001	2,999996	30,47937	

Рисунок 5 – Массив входных данных

Следующий этап состоит из вычисления оценки параметров полученного распределения:

- математическое ожидание \bar{y} :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n y_n \quad (11)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n y_n = 29,35^\circ\text{C} \quad (12)$$

- оценка суммарной стандартной неопределенности результата измерения:

$$u_c(y) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (y_q - \bar{y})^2} \quad (13)$$

$$u_c(y) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (y_q - \bar{y})^2} = 0,62^\circ\text{C} \quad (14)$$

- расширенная неопределенность для заданного уровня доверия

$$U_p = \frac{1}{2} [y_{n(1+p)/2} - y_{n(1-p)/2}] \quad (15)$$

$$U_p = \frac{1}{2} [y_{n(1+p)/2} - y_{n(1-p)/2}] = 1,03^\circ\text{C} \quad (16)$$

Где $y_{n(1+p)/2}$ и $y_{n(1-p)/2}$ – соответствующие члены упорядоченного массива данных выходной величины. Для $P = 0,95$ и $n = 10^6$ для расчёта берут 975000 и 25000 член упорядоченного массива выходной величины.

- оценку коэффициента охвата:

$$k = \frac{U_p}{u_c(y)} \quad (17)$$

$$k = \frac{U_p}{u_c(y)} = \frac{1,03}{0,062} = 1,7 \quad (18)$$

На рисунках 6,7,8 показаны распределения входных величин.

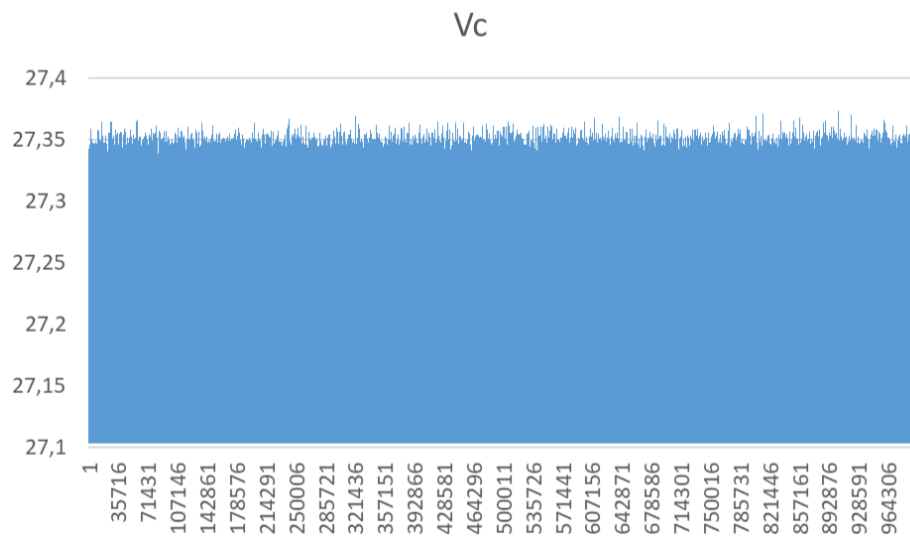


Рисунок 6 – Значения входной величины V_c

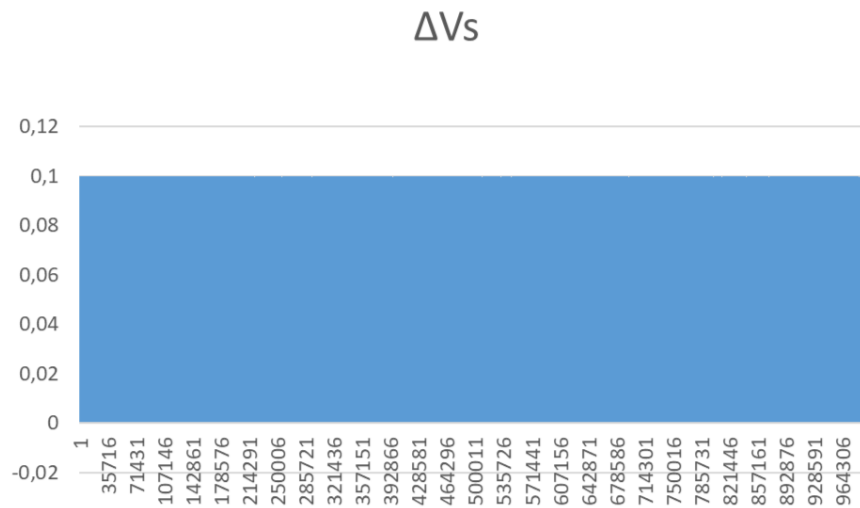


Рисунок 7 – Значения входной величины ΔV_s

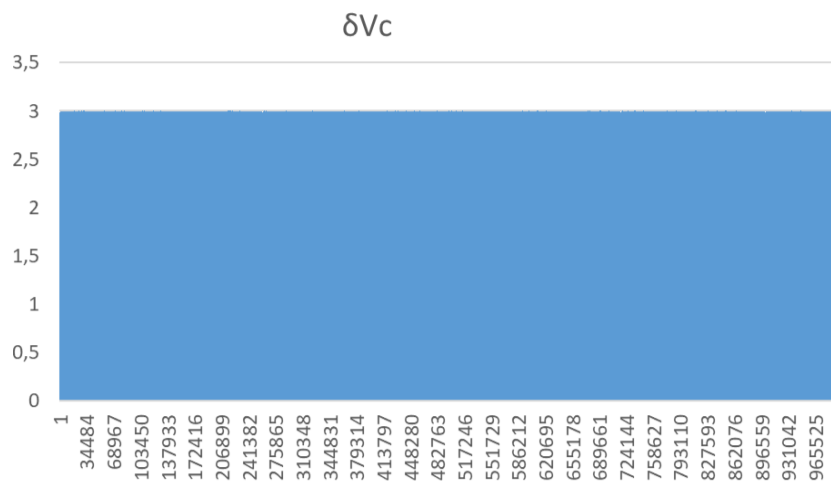


Рисунок 8 – Значения входной величины δV_c

Результаты и обсуждение.

Сравним результаты измерения, полученные методами GUM и Монте-Карло:

GUM: $E_x = (27,3 \pm 1,2) ^\circ\text{C}$, $P = 0,95$.

ММК: $E_x = (29,3 \pm 1,03) ^\circ\text{C}$, $P = 0,95$.

В ходе исследования были применены два метода оценки неопределенности: GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) и метод Монте-Карло (ММК). Рассчитанные значения температуры с указанием расширенной неопределенности и доверительной вероятности $P = 0,95$ представлены следующим образом: для метода GUM $E_x = (27,3 \pm 1,2) ^\circ\text{C}$, а для метода Монте-Карло $E_x = (29,3 \pm 1,03) ^\circ\text{C}$. Анализ результатов показывает, что между двумя методами есть различия. Среднее значение, полученное методом Монте-Карло, оказалось выше на 2,0 градуса, что может быть связано с учетом более широкого спектра факторов неопределенности или особенностями статистического подхода метода Монте-Карло. При этом расширенная неопределенность по методу GUM больше, что указывает на более высокую точность оценки при использовании этого метода.

Метод GUM, основанный на аналитическом подходе, демонстрирует свою надежность и эффективность в задачах, где измерительная модель обладает линейными зависимостями, а входные параметры имеют независимые и нормальные распределения. Кроме того, метод GUM позволяет быстро оценивать неопределенность, опираясь на аналитическое выражение модели и известные статистические характеристики, минимизируя затраты вычислительных ресурсов и времени. Он особенно полезен в стандартных задачах, где требуется обоснованная оценка при ограниченных ресурсах.

С другой стороны, метод Монте-Карло демонстрирует большую адаптивность к сложным условиям измерений, включая нелинейные зависимости и сложные распределения параметров. Он не требует высокой квалификации исполнителя, так как процесс расчёта полностью автоматизирован. Использование большого числа случайных выборок, например, 1,000,000 позволяет получить распределение результатов, максимально приближенное к реальным условиям. При этом данный метод также требует меньше вычислительных ресурсов и времени в сравнении с традиционным аналитическим подходом при решении сложных задач.

Заключение.

Проведённое исследование подтвердило значимость выбора метода оценки неопределенности измерений для повышения точности и надёжности метрологических данных. Сравнительный анализ методов GUM и Монте-Карло, выполненный на примере калибровки биметаллического термометра ТБП 63, продемонстрировал, что каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки.

Метод GUM показал высокую эффективность в условиях линейных моделей с нормальными распределениями входных величин. Его использование обеспечивает простоту и воспроизводимость вычислений, а также минимизирует потребление вычислительных ресурсов. Это делает метод предпочтительным для стандартных задач, требующих оперативной и точной оценки неопределенности. Однако этот метод требует больше времени на вычисления, что может быть критичным в условиях ограниченных ресурсов.

Использование 1,000,000 симуляций позволило учесть широкий спектр факторов, влияющих на результат измерений, и обеспечило оценку неопределенности.

Таким образом, результаты исследования показывают, что метод GUM остаётся стандартом для большинства метрологических приложений, особенно в условиях ограниченности вычислительных мощностей. В то же время метод Монте-Карло является важным дополнением для задач с высокой сложностью и детализированностью анализа. Перспективы дальнейших исследований включают разработку комбинированного подхода, который объединит сильные стороны обоих методов, что позволит достичь высокой точности и универсальности в оценке неопределенности измерений.

Благодарность, конфликт интересов

Авторы выражают искреннюю благодарность лаборатории “Scientia Kazakhstan” за предоставленные услуги калибровки.

Список литературы

1. JCGM 200:2008. (2008) International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms, 3rd Edition. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 90 p. (in English)
2. ISO/IEC 17025-2019. (2017) General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission, 30 p. (in English)
3. СТ РК 2.184-2010. (2010) Оценка неопределенности при калибровке/поверке средств измерений (Estimation of Uncertainty in Calibration/Verification of Measuring Instruments). Астана: Комитет по техническому регулированию и метрологии Республики Казахстан, 64 с. (in Kazakh)
4. JCGM 200:2012. (2012) International vocabulary of metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), 3rd ed. Joint Committee for Guides in Metrology, 91 p. (in English)
5. ISO. (1993) Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First Edition. Switzerland, 101 p. (in English)
6. МИ 2552-99. (1999) Рекомендация. ГСИ. Применение Руководства по выражению неопределенности измерений (Recommendation. GSI. Application of the Guide to the Expression of Measurement Uncertainty). ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург, 31 с. (in Russian)
7. Willink R. (2013) Measurement Uncertainty and Probability. Cambridge: Cambridge University Press, 276 p. (in English)
8. EA-4/02. (1999) Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. European Co-operation for Accreditation, 79 p. (in English)
9. Dieck R. H. (2007) Measurement Uncertainty: Methods and Applications, 4th ed. ISA, 277 p. (in English)
10. Measurement uncertainty estimations: GUM method. [Electronic resource]. Available at: <https://www.wasyresearch.com/measurement-uncertainty-estimations-gum-method/> (Accessed: March 2025). (in English)
11. Хан С.Г. (2018) Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством: Учебное пособие (Metrology, Standardization, Certification, and Quality Management: Textbook). Алматы: АУЭС, 118 с. (in Russian)
12. Международный словарь по метрологии. (2010) Основные и общие понятия и соответствующие термины (International Vocabulary of Metrology: Basic and General Concepts and Corresponding Terms), 2-е издание, исправленное. Санкт-Петербург: НПО «Профессионал», 84 с. (in Russian)
13. СТ РК 2.185-2010. (2010) ГСИ РК. Результаты и характеристики погрешности измерений (State System for Ensuring Uniformity of Measurements of the Republic of Kazakhstan. Results and Characteristics of Measurement Errors). (in Kazakh)
14. GOST ISO 5725-1-2003. (2003) Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results. Part 1. General Principles and Definitions. Moscow: Standartinform. (in English)
15. СТ РК 1.9-2019. (2019) Национальная система стандартизации Республики Казахстан. Общие требования к применению международных, региональных стандартов и стандартов иностранных государств на территории Республики Казахстан (National Standardization System of the Republic of Kazakhstan. General Requirements for the Application

of International, Regional, and Foreign National Standards in the Republic of Kazakhstan). Астана: Мемстандарт. (in Kazakh)

References

1. JCGM 200:2008. (2008) International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms, 3rd Edition. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 90 p. (in English)
2. ISO/IEC 17025-2019. (2017) General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories. International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission, 30 p. (in English)
3. ST RK 2.184-2010. (2010) Ocenka neopredelennosti pri kalibrovke/poverke sredstv izmereniy [Estimation of Uncertainty in Calibration/Verification of Measuring Instruments]. Astana: Komitet po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii Respubliki Kazakhstan, 64 p. (in Kazakh)
4. JCGM 200:2012. (2012) International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), 3rd ed. Joint Committee for Guides in Metrology, 91 p. (in English)
5. ISO. (1993) Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First Edition. Switzerland, 101 p. (in English)
6. MI 2552-99. (1999) Rekomendatsiya. GSI. Primenenie Rukovodstva po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniy [Recommendation. GSI. Application of the Guide to the Expression of Measurement Uncertainty]. VNIIM im. D.I. Mendeleeva, St. Petersburg, 31 p. (in Russian)
7. Willink, R. (2013) Measurement Uncertainty and Probability. Cambridge: Cambridge University Press, 276 p. (in English)
8. EA-4/02. (1999) Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. European Co-operation for Accreditation, 79 p. (in English)
9. Dieck, R. H. (2007) Measurement Uncertainty: Methods and Applications, 4th ed. ISA, 277 p. (in English)
10. Measurement uncertainty estimations: GUM method. [Electronic resource]. Available at: <https://www.wasyresearch.com/measurement-uncertainty-estimations-gum-method/> (Accessed: March 2025). (in English)
11. Han S.G. (2018) Metrologiya, Standartizatsiya, Sertifikatsiya i Upravlenie Kachestvom: Uchebnoe Posobie (Dlya Studentov Spetsial'nosti "Avtomatizatsiya i Upravlenie") [Metrology, Standardization, Certification, and Quality Management: Textbook (for Students of the "Automation and Control" Specialty)]. Almaty: AUES, 118 p. (in Russian)
12. Mezhdunarodnyy slovar' po metrologii. (2010) Osnovnye i Obshchie Ponyatiya i Sootvetstvuyushchie Terminy: Per. s Angl. i Fr. / Vseros. Nauch.-Issled. In-t Metrologii im. D. I. Mendeleeva, Belorus. Gos. In-t Metrologii. Izd. 2-e, Ispr. [International Vocabulary of Metrology: Basic and General Concepts and Corresponding Terms, 2nd ed., Corrected]. St. Petersburg: NPO "Professional", 84 p. (in Russian)
13. ST RK 2.185-2010. (2010) GSI RK. Rezultaty i Kharakteristiki Pogreshnosti Izmereniy [State System for Ensuring Uniformity of Measurements of the Republic of Kazakhstan. Results and Characteristics of Measurement Errors]. (in Kazakh)
14. GOST ISO 5725-1-2003. (2003) Tochnost' (Pravil'nost' i Precizionnost') Metodov i Rezul'tatov Izmereniy. Chast' 1. Osnovnye Polozheniya i Opredeleniya [Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results. Part 1. General Principles and Definitions]. Moscow: Standartinform. (in Russian)
15. ST RK 1.9-2019. (2019) Natsional'naya Sistema Standartizatsii Respubliki Kazakhstan. Obshchie Trebovaniya k Primeneniyu Mezhdunarodnykh, Regional'nykh Standartov i Standartov Inostrannykh Gosudarstv na Territorii Respubliki Kazakhstan [National Standardization System of the Republic of Kazakhstan. General Requirements for the Application

of International, Regional, and Foreign National Standards in the Republic of Kazakhstan]. Astana: Memstandart. (in Kazakh)

ӨЛШЕУ БЕЛГІСІЗДІГІН БАҒАЛАУ: БИМЕТАЛЛДЫ ТЕРМОМЕТР МЫСАЛЫНДА GUM ЖӘНЕ МОНТЕ-КАРЛО ӘДІСТЕРІН САЛЫСТЫРУ

Аңдатпа. Бұл мақалада өлшеу белгісіздігін бағалаудың GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) және Монте-Карло әдістерінің салыстырмалы талдауы 0-ден 120 °C-қа дейінгі өлшеу диапазоны және дәлдік сыныбы 2.5 бар ТБП 63-1 биметалл термометрін калибрлеу мысалында ұсынылған. Зерттеу белгісіздіктің негізгі факторларын, соның ішінде стохастикалық және жүйелік қателіктерді анықтауға және сандық талдауға бағытталған. GUM әдісін қолдану көптеген процедураларды орындау үшін жоғары математикалық білімді талап етеді, ал Монте-Карло әдісі әртүрлі зертханалық зерттеулерге балама бола алады.

Өлшенген температураны сипаттау үшін математикалық модель енгізілді, ол $E_x = V_c + \Delta V_c + \delta V_c$ түрінде ұсынылған, мұнда әрбір компонент жалпы белгісіздікке өз үлесін қосады: V_c – термометр көрсеткіштері, ΔV_c – калибратордың түзетуі, ал δV_c – бөліну бағасының жартысы. Талдау процесіне кездейсоқ тербелістерді бағалау үшін өлшемдер сериясынан А типті стандартты белгісіздікті есептеу, ал жүйелі көздер үшін В типті стандартты белгісіздіктер біркелкі және тікбұрышты қателіктер таралуын болжау арқылы бағаланады. Өлшеулердің жалпы стандартты белгісіздігі қамту коэффициенті $k=2$ және сенімділік деңгейі 0.95 болатын кеңейтілген белгісіздікті алу үшін біріктірілген.

Монте-Карло әдісін қолдана отырып, статистикалық маңыздылыққа қол жеткізу үшін 1,000,000 симуляция жасалды. Талдау нәтижелері барлық есептелген белгісіздіктерді ескеретін соңғы түзетілген температура мәні ретінде ұсынылды.

Зерттеудің негізгі мақсаты – бұл өлшеу жабдығы үшін қай әдістің тиімдірек екенін анықтау және функционалдық тәуелділіктерге негізделген белгісіздіктерді бағалау үшін Microsoft Excel (немесе ұқсас кестелік бағдарламалық қамтамасыз етуді) пайдаланудың қарапайымдылығын көрсету.

Түйін сөздер: Монте-Карло әдісі, GUM, биметалл термометр, белгісіздік, қате, Microsoft Excel.

MEASUREMENT UNCERTAINTY EVALUATION: COMPARISON OF GUM AND MONTE CARLO METHODS ON THE EXAMPLE OF A BIMETALLIC THERMOMETER

Abstract. This article presents a comparative analysis of uncertainty evaluation methods, GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) and Monte Carlo, using the calibration of a bimetallic thermometer TBP 63-1 with a measurement range of 0 to 120 °C and an accuracy class of 2.5. The study focuses on the identification and quantitative analysis of key uncertainty factors, including both stochastic and systematic error components. GUM modeling requires a high level of mathematical expertise to perform many procedures, while the Monte Carlo method serves as an alternative for various laboratory studies.

A mathematical model is introduced to describe the measured temperature, represented as $E_x = V_c + \Delta V_c + \delta V_c$, where each component reflects its respective contribution to overall uncertainty: V_c is the thermometer reading, ΔV_c is the calibrator correction, and δV_c is half the scale division. The analysis process includes calculating the type A standard uncertainty from a series of measurements to assess random fluctuations, while type B standard uncertainties are estimated for systematic sources, assuming uniform and rectangular error distributions. The combined standard uncertainty is integrated to obtain the expanded uncertainty with a coverage

factor $k=2$ and a confidence level of 0.95. Using the Monte Carlo method, 1,000,000 simulations were generated to ensure statistical significance.

The analysis results are presented as the final corrected temperature value, accounting for all calculated uncertainties. The primary goal of the study is to determine which method is more effective for this type of measuring equipment and to demonstrate the simplicity of using Microsoft Excel (or similar spreadsheet software) for evaluating measurement uncertainties based on functional dependence.

Keywords: Monte-Carlo method, GUM, bimetallic thermometer, uncertainty, error, Microsoft Excel.

Сведения об авторах

Ермек Бакберген Қайратұлы	Автор для корреспонденции, магистр 1 курса по специальности «Управление качеством и методы, системы диагностики», КазННТУ им. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: ermekbakbergen1@bk.ru, https://orcid.org/0009-0006-6312-8935
Беккожин Руслан Сабырович	Руководитель ФАА РГП «КазСтандарт» по г. Алматы и Алматинской области E-mail:r.bekkozhin@ksm.kz
Әлиқызы Аяулым	Магистр 1 курса по специальности «Управление качеством и методы, системы диагностики», КазННТУ им. Сатпаева, Алматы, Казахстан E-mail: ayaulimalikizi05@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-6312-8935
Шинбаева Айнура Қадыржановна	PhD, ассоциированный профессор, КазННТУ им. Сатпаева, Алматы, Казахстан E-mail: a.shinbayeva@satbayev.university , https://orcid.org/0000-0003-3875-8397
Омарова Жансая Бағдатқызы	PhD, ассоциированный профессор, КазННТУ им. Сатпаева, Алматы, Казахстан E-mail: zh.omarova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-1101-7735

Авторлар туралы мәлімет

Ермек Бакберген Қайратұлы	«Сапаны басқару және диагностикалау әдістері мен жүйелері» мамандығының 1-курс магистранты, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: ermekbakbergen1@bk.ru , https://orcid.org/0009-0006-6312-8935
Беккожин Руслан Сабырович	«КазСтандарт» РМК Алматы қаласы және Алматы облысы бойынша филиалы директоры, E-mail:r.bekkozhin@ksm.kz
Әлиқызы Аяулым	«Сапаны басқару және диагностикалау әдістері мен жүйелері» мамандығының 1-курс магистранты, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: ayaulimalikizi05@gmail.com , https://orcid.org/0009-0006-6312-8935
Шинбаева Айнура Қадыржановна	PhD, қауымдастырылған профессор, КазННТУ им Сатпаева, Алматы, Қазақстан E-mail: a.shinbayeva@satbayev.university , https://orcid.org/0000-0003-3875-8397
Омарова Жансая Бағдатқызы	PhD, қауымдастырылған профессор, КазННТУ им Сатпаева, Алматы, Қазақстан E-mail: zh.omarova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-1101-7735

Information about the authors

Yermek Bakbergen	Corresponding author, 1st-year master's student majoring in "Quality management and diagnostic methods and systems", Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan E-mail: ermekbakbergen1@bk.ru, https://orcid.org/0009-0006-6312-8935
Bekkozhin Ruslan	Director of the FAA RSE "KazStandard" for Almaty City and Almaty Region E-mail:r.bekkozhin@ksm.kz
Alikyzy Ayaulim	1st-year master's student majoring in "Quality management and diagnostic methods and systems", Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan E-mail: ayaulimalikizi05@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-6312-8935
Ainura Shinbayeva	Ph.D., associate professor sciences, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan, E-mail: a.shinbayeva@satbayev.university , https://orcid.org/0000-0003-3875-8397
Omarova Zhansaya	Ph.D., associate professor sciences, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan, E-mail: zh.omarova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-1101-7735



ӘОЖ 004.85

ҒТАХА 28.23.25

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_8

А.Б.Омар^{1*}, Ш.Ж.Мусиралиева¹

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: aiym.omar98@gmail.com*

АГРЕССИВТІ МАЗМҰНДЫ ЖІКТЕУ МІНДЕТТЕРІ ҮШІН ФЕДЕРАТИВТІ ОҚЫТУ: ТРАНСФОРМЕР МОДЕЛЬДЕРІ НЕГІЗІНДЕГІ ӘДІС

Аңдатпа. Цифрлық коммуникацияның қарқынды дамуы интернетте агрессивті мазмұндағы жазбалардың көбеюіне себеп болды. Мұндай мазмұнды жазбаларды автоматты түрде анықтау қазіргі заманның өзекті мәселелерінің бірі болып отыр. Алайда деректерді орталық серверге жинауға негізделген дәстүрлі тәсілдер жеке ақпараттың құпиялығын бұзуы мүмкін. Осы мәселені шешудің бір жолы – федеративті оқыту әдісін қолдану. Бұл әдісте деректерді орталық серверге жібермей-ақ, әрбір пайдаланушы құрылғысында жеке формада модельді оқыту қарастырылады. Зерттеу жұмысын жүргізу барысында ғылыми еңбектерге әдеби шолу жасалып, федеративті оқыту әдісін қолдану тәжірибесі талданды. Деректер жиынтығы ретінде 73 572 жазбадан тұратын агрессивті және агрессивті емес мәтіндерден құралған арнайы корпус пайдаланылды. Модельді оқыту үшін DistilBERT моделі пайдаланылды және деректер жиынтығы үш клиент арасында бөлініп, әрқайсысы тек өз жазбаларын жеке оқытты. Ал сервер әр раундтың соңында FedAvg алгоритмі арқылы барлық клиенттер ұсынған модель параметрлері серверде біріктіріліп, ортақ глобалды модель құрылды. Алынған нәтижелер негізінде федеративті оқыту әдісі екі маңызды артықшылығын анықтады: ол ең алдымен, жоғары дәлдікпен жұмыс жасайды, екіншіден, ақпаратқа қатысты сенімділік пен құпиялылықты қамтамасыз етеді.

Түйін сөздер: федеративті оқыту, NLP, DistilBERT, FedAvg, құпиялылықты сақтау, агрессивті мазмұн, классификациялау.

Кіріспе.

Кибербуллинг, өшпенділік тілі, кемсіту және басқа да вербалды агрессия мазмұнды мәтін әлеуметтік желілердегі пікірлерде, жарияланымдарда және жеке хабарламаларда кең таралған. Мұндай мазмұнды мәтіндер жеке тұлғаның эмоционалдық күйіне кері әсер етіп, интернеттегі қарым-қатынас мәдениетінің бұзылуына алып келуі мүмкін.

Бұл мәселені шешу үшін, яғни мәтіндердегі агрессивті мазмұнды автоматты түрде анықтау мақсатында табиғи тілді өңдеу (NLP) және машиналық оқыту әдістері қолданылады. Алайда, бұл шешімдердің көпшілігі пайдаланушы деректерін жинаудың және оларды орталық серверде сақтаудың дәстүрлі әдістерін қолданады. Бұл құпиялылықтың бұзылуына, ақпараттың ағып кетуіне және деректердің қауіпсіздігіне байланысты басқа да қауіптерге әкелуі мүмкін. Бұл әсіресе жеке ақпаратты пайдалану мен тасымалдауды қатаң шектейтін Деректерді қорғаудың жалпы ережесі (GDPR) сияқты халықаралық заңнама талаптарына сай өте маңызды.

Бұл мәселені шешу үшін федеративті оқытуды (Federated Learning, FL) пайдалану ұсынылады. Федеративті оқыту сервердегі барлық деректерді орталықтандырылған түрде

жинаудың орнына, оқыту процесін тікелей смартфондар немесе компьютерлер сияқты пайдаланушы құрылғыларында жүзеге асырылады. Содан кейін ол серверге деректердің өзін емес, тек оқыту нәтижелерін жібереді. Сервер бұл деректерді барлық құрылғылардан жинайды, оларды біріктіреді және жаһандық модельді жаңартады.

Бұл тәсіл құпия ақпаратты қорғаудың жоғары деңгейін қамтамасыз етеді, өйткені бастапқы деректер клиенттің өзінде қалады және желі арқылы берілмейді, бұл дербес деректерге рұқсатсыз қол жеткізу және ағып кету тәуекелдерін айтарлықтай төмендетеді.

Бұл зерттеудің мақсаты федеративті оқыту әдісін қолдана отырып, DistilBERT моделіне негізделген агрессивті мазмұнды анықтау жүйесін құру болып табылады. Ұсынылған тәсілде деректер бірнеше клиенттер арасында бөлінеді, олардың әрқайсысы өзінің жергілікті моделін үйретеді, содан кейін параметрлер FedAvg алгоритмі арқылы біріктіріледі. Бұл тәсіл пайдаланушы деректерінің құпиялылығын сақтай отырып, жоғары анықтау дәлдігіне мүмкіндік береді.

Материалдар мен зерттеу әдістері.

Модельді оқыту және бағалау үшін агрессивті мазмұнды құрайтын деректер жинағы қолданылды. Деректер жинағы 73 572 мәтіндік жолды құрайды, олардың әрқайсысына бинарлық белгі қойылған: 0 – агрессивті емес пікір, 1 – агрессивті пікір. Хабарламалар ретінде пайдаланушылардың ағылшын тілінде әр түрлі формада жазған қысқа мәтіндері ұсынылған: сабырлы пікірлерден бастап агрессивті және арандатушы сөздерге дейін. Деректер жинағында берілген мәтіндерінің сапасын жақсарту мақсатында, мәтіндерден арнайы таңбалар, эмодзилер мен тыныс белгілері алынып, барлық әріптер кіші әріптерге ауыстырылды. Сонымен қатар, бос жолдар және екі таңбадан қысқа мәтіндер жойылды. Орындалған алдын ала өңдеу жұмыстары бізге жеткілікті нұсқада деректер корпусын қалыптастыруға мүмкіндік берді. Бұл модельді тиімді оқыту және тестілеу үшін қажетті жағдайларды қамтамасыз етті.

Мәтіндерді нейрондық желілік архитектураға жіберуге жарамды сандық форматқа түрлендіру үшін Hugging Face Transformers кітапханасының бөлігі ретінде жүзеге асырылған алдын ала дайындалған DistilBERTTokenizer пайдаланылды. Нәтижесінде көрсетілгендей үш кіріс құрылымы қалыптасты (сурет-1):

- input_ids (мәтіндердің сандарға айналдырылған нұсқасы);
- attention_mask (маңызды токендерді көрсетуге арналған маска);
- labels (берілген мәтіннің категориясы: 1 – агрессивті, 0 – агрессивті емес).

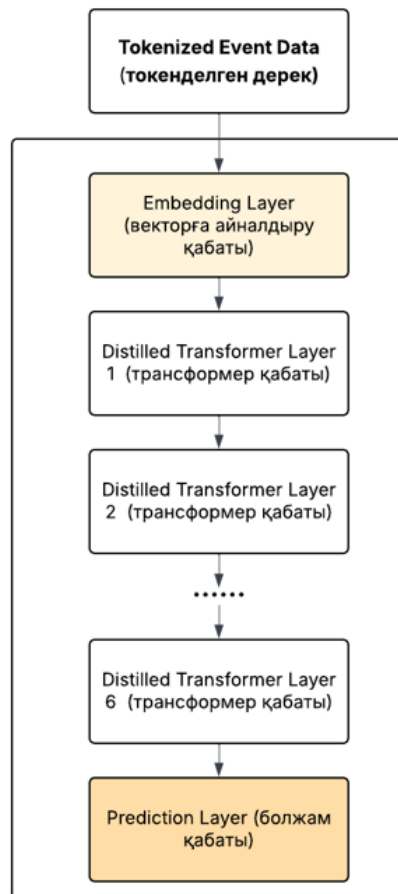
	input_ids \	
0	[101, 2017, 2123, 2102, 2113, 2073, 2115, 6898...	
1	[101, 4388, 24415, 4430, 4140, 14697, 7743, 10...	
2	[101, 7632, 22052, 11156, 2400, 2350, 11891, 4...	
3	[101, 2363, 1998, 5838, 12362, 102, 0, 0, 0...	
4	[101, 1996, 27178, 2869, 10373, 2134, 2102, 25...	

	attention_mask	label
0	[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, ...	1
1	[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, ...	1
2	[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, ...	1
3	[1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, ...	0
4	[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, ...	0

Сурет 1 – Токенделген үлгідегі деректер жинағы

Классификатор ретінде DistilBERT моделі қолданылды. DistilBERT моделі BERT моделінің жеңілдетілген және оңтайландырылған нұсқасы болып табылады. Оның негізгі артықшылықтарының бірі жоғары өнімділігі және есептеу шығындарының төмендігінде.

DistilBERT модельдің схемалық құрылымы 1-суретте көрсетілген [1]. Ол деректерді өңдеу барысындағы кіріс қабаты мен шығыс қабатындағы болжамға дейінгі қадамдарды бейнелейді.



Сурет 2 – DistilBERT моделінің архитектурасы

Суретте зерттеуде пайдаланылған DistilBERT моделінің архитектурасы көрсетілген. Токенизацияланған кіріс деректері алдымен векторлық көрініске түрленеді, содан кейін 6 трансформер қабаттары арқылы өтеді.

DistilBERT моделі [2] шектеулі есептеу ресурстарына байланысты таңдалды, өйткені ол бастапқы BERT өнімділігінің 97% сақтайды, бірақ параметрлердің жартысын ғана пайдаланады. Бұл оны федеративті оқыту жағдайында агрессивті мазмұнды жіктеу мәселелеріне оңтайлы шешім ретінде ұсынады.

Федеративті оқыту жүйесі.

Федеративті оқыту тұжырымдамасына тоқталсақ [3], бұл – деректерді жергілікті құрылғыларда сақтай отырып, модельдерді оқытуға арналған машиналық оқыту әдісі. Бұл тәсіл деректердің құпиялылығы мен қауіпсіздігін қамтамасыз етуге бағытталған. Деректерді орталық серверге жіберудің орнына, әрбір құрылғы модельдерді өзінде оқытады және тек модель параметрлерінің жаңартуларымен, мысалы, салмақтар мен градиенттермен алмасады. Жиналған жаңартулардың негізінде ортақ жаһандық модель қалыптастырылады.

Федеративті оқытудың архитектурасы, қолданылуы және түрлі салалардағы даму перспективалары туралы көптеген зерттеулер жүргізілген. Бұл жұмыстар федеративті оқытудың келешегі зор екенін растайды. Мәселен 1-кестеде келесі авторлардың еңбектері қарастырылған.

Кесте 1 – Федеративті оқыту әдісі бойынша әдебиеттерге шолу

Әдебиеттер	Автор(лар), жылы	Жұмыстың атауы	Зерттеудің мақсаты	Нәтижесі
[4]	Xin'ao Wang, Huan Li, Ke Chen, Lidan Shou, 2023	FedBFPT: An Efficient Federated Learning Framework for BERT Further Pre-training	Федеративті оқыту арқылы BERT моделін салалық міндеттерге бағыттап, есептеу және байланыс шығындарын азайта отырып жетілдіру.	JNLPBA: 0.71; SciERC: 0.64; RCT-20k: 0.83.
[5]	Mohanad Sarhan, Siamak Layeghy, Nour Moustafa, Marius Portmann, 2023	Cyber Threat Intelligence Sharing Scheme Based on Federated Learning for Network Intrusion Detection	Бірнеше ұйымның қатысуымен киберқауіптерді анықтауға арналған NIDS моделін бірігіп оқыту	91.16–93.08% дәлдік көрсетті, шабуылдарды 93% деңгейде анықтады.
[6]	Dr.Aradhana Sahu, Dr. Yousef және т.б., 2024	Federated LSTM Model for Enhanced Anomaly Detection in Cyber Security	Федеративті оқыту мен LSTM модельдерін біріктіру	NSL-KDD, KDD-99, UNSW-NB15 деректерінде дәлдік – 98.9%
[7]	B.Olanrewaju-George, B. Pranggono, 2025	Federated learning-based intrusion detection system for IoT using unsupervised and supervised DL models	IoT құрылғылары үшін федеративті оқыту арқылы аномалияны анықтау	F1-score – 93%, Recall – 99.9%, Precision – 99.3%;
[8]	Arash Heidari, Nima Jafari Navimipour, Hasan Dag, Samira Talebi, Mehmet Unal, 2024	A Novel Blockchain-Based Deepfake Detection Method Using Federated and Deep Learning Models	Дипфейктерді анонимді әрі қауіпсіз түрде анықтайтын жүйе жасау	ACC ≥ 98.9% AUC ≥ 99.3%

Федеративті оқыту негізінде құрылған жүйелер үш негізгі компоненттен тұрады, олардың әрқайсысы жүйенің үздіксіз жұмыс істеуін қамтамасыз ететін маңызды рөл атқарады [9]:

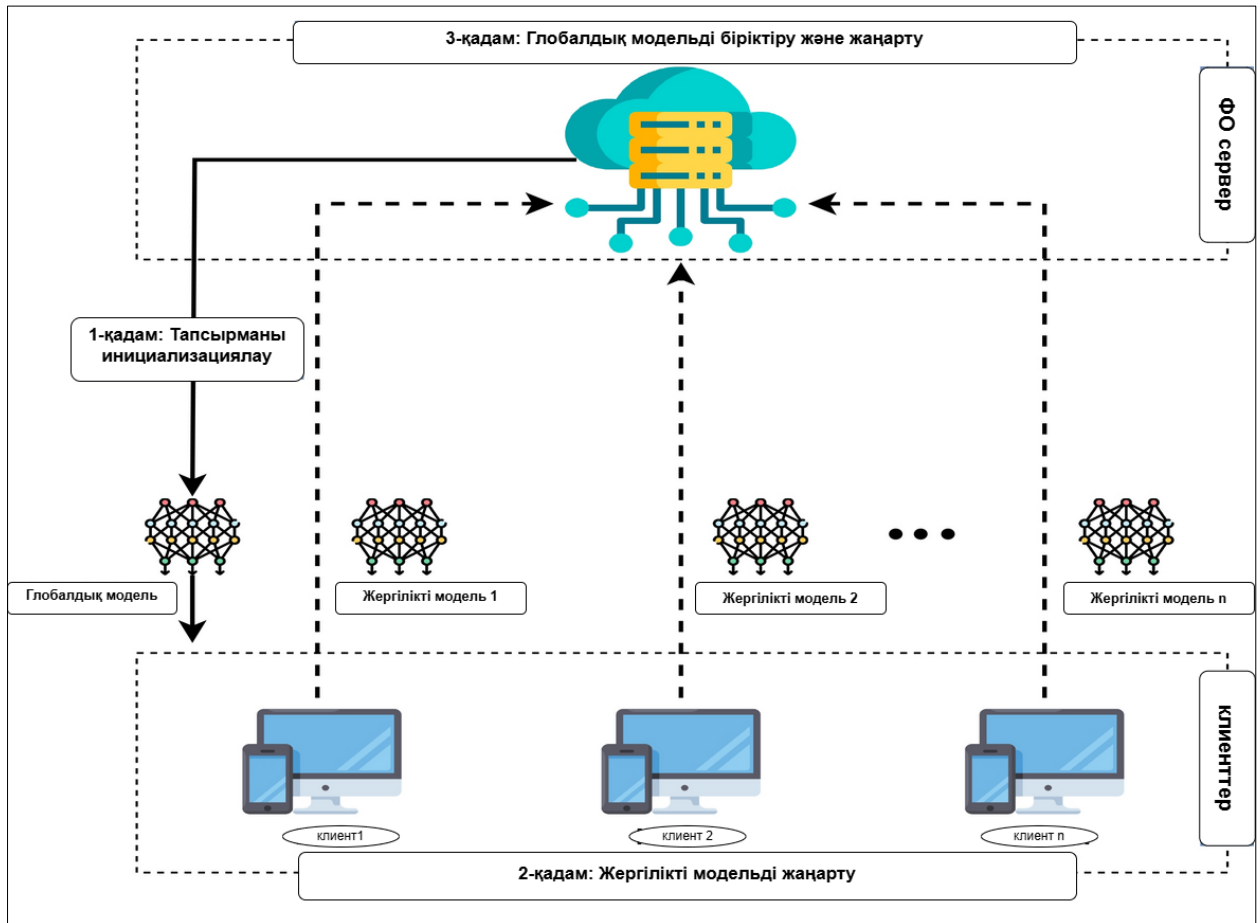
Клиенттер – деректердің иесі болып табылатын құрылғылар немесе ұйымдар. Олар жергілікті модельдерді оқытады, деректерді сыртқа шығармай өңдейді. Мысал: Смартфондар, IoT құрылғылары, ұйым ішіндегі серверлер.

Сервер федеративті оқытудың үйлестірушісі ретінде әрекет етеді. Ол клиенттерден алынған модель жаңартуларын жинақтап, глобалдық модельді қалыптастырады. Мысал: Орталық сервер немесе бұлттық жүйе.

Коммуникациялық-есептеу ортасы – клиенттер мен сервер арасындағы модель параметрлерімен алмасуды қамтамасыз ететін байланыс арнасы. Құпиялылықты сақтау үшін шифрлау технологиялары қолданылады. Мысал: Желі байланысы (Wi-Fi, мобильді байланыс).

Бұл үш компоненттің өзара әрекеттесуі деректердің құпиялылығын сақтай отырып, үлестірілген оқыту процесін тиімді ұйымдастыруға мүмкіндік береді. Клиенттер жергілікті модельдерді оқытса, сервер глобалдық модельді үйлестіреді және агрегаттайды, ал

коммуникациялық-есептеу ортасы параметрлердің алмасуын қамтамасыз етеді. Бұл жүйе орталықтандырылмаған және қауіпсіз түрде модельді оқытуға мүмкіндік береді, әсіресе деректер құпиялылығын сақтау қажет салаларда тиімді. Мәселен 3-суретте автор Shabnam Saki [10] өзінің мақаласында қолданған федеративті оқыту архитектурасы көрсетілген.



Сурет 3 – Федеративті оқыту әдісінің архитектурасы

Бұл архитектура үш негізгі қадамды қамтитын федеративті оқытудың стандартты жұмыс процесін көрсетеді:

1. Тапсырманы инициализациялау: сервер барлық клиенттік түйіндерге бастапқы глобалдық модель параметрлерін жібереді.

2. Жергілікті оқыту: әрбір клиент өзінің жергілікті деректерін пайдалана отырып, өзінің жаңа жергілікті моделін оқытады. Бұл деректердің құпиялылығын сақтауға мүмкіндік береді, себебі деректердің өзі пайдаланушы құрылғысында қалады.

3. Глобалдық агрегация: сервер клиенттерден алынған жергілікті модель жаңартуларын біріктіру арқылы жаһандық модельді жаңартады.

2 және 3-ші қадамдар қажетті дәлдікке жеткенше қайталанады. Бұл федеративті оқыту процесі әртүрлі машиналық оқыту модельдеріне қолданылады.

Клиенттер арасында деректерді бөлу (IID принципі).

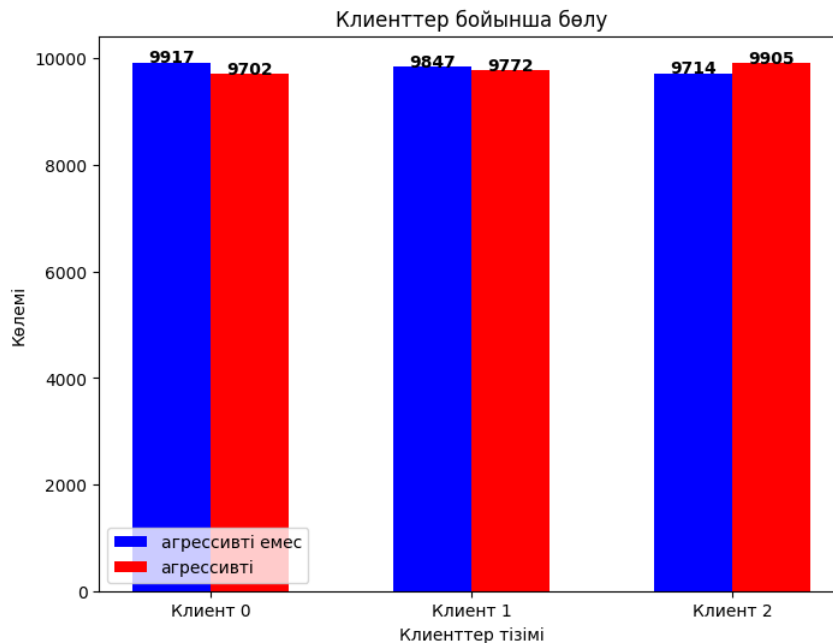
Жүргізілген зерттеу жұмысы аясында деректерді үш клиент арасында бөлу IID принципі бойынша жүзеге асады. Әр клиентке шамамен тең пропорцияда агрессивті және агрессивті емес мәтіндер бөлінді, бұл әсіресе 4-суретте айқын көрінеді. Суретте көріп отырғанымыздай, барлық үш клиент IID (Independent and Identically Distributed) әдісін пайдалану арқылы салыстырмалы тең көлемді ақпарат алған. Агрессивті емес

хабарламалар көк түспен, ал агрессивті хабарламалар қызыл түспен көрсетілген. Көлденең осьте клиенттер саны, ал тік осьте тиісті классқа жататын көрсеткіштердің саны бейнеленген. Нәтижесінде:

Клиент 0: 9917 агрессивті емес және 9702 агрессивті мәтін

Клиент 1: 9847 агрессивті емес және 9772 агрессивті мәтін

Клиент 2: 9714 агрессивті емес және 9905 агрессивті мәтін



Сурет 4 – IID принципі бойынша клиенттер арасында деректер жинағын бөлу

Федеративті оқытуда IID әдісі клиенттер арасында деректерді тең бөлу үшін қолданылады. Яғни класстар арасындағы тепе-теңдік болу үшін қолданамыз. Бұл класстарды анықтау барысында дәлдікті қамтамасыз етеді.

IID әдісін математикалық тұрғыдан алғанда [11], толық деректер жиыны – D , көлемі – N болатын жұптардың жиынтығы ретінде (x_i, y_i) , мұнда x_i – кіріс мән (мысалы, мәтін), ал $y_i \in \{0; 1\}$ – сәйкес класстық меткасы (агрессивті емес немесе агрессивті):

$$D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N, \quad (1)$$

$$D = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_k, \quad D_k \subset D, \quad |D_k| \approx \frac{N}{K} \quad (2)$$

Деректерді үлестірілуі кезінде әрбір клиентке өзіне тиесілі деректер жиыны – D_k бастапқы жалпы жиын D -ден кездейсоқ түрде алына отырып класстар арасында тепе-теңдікті сақтайды (агрессивті емес және агрессивті):

$$P(y = c | x \in D_k) = P(y = c | x \in D), \quad \forall k, \forall c \in C, \quad (3)$$

мұндағы C – класстар, біздің жағдайда $C = \{0, 1\}$;

$P(y = c | x \in D_k)$ – k -клиенттің деректерінде класстың кездесу ықтималдығы;

$P(y = c | x \in D)$ – бастапқы деректер жиынындағы класстардың жиілігі.

Осындай біркелкі бөлудің арқасында әр клиент модельді оқытуда бірдей маңызды рөл атқара алады. Нәтижесінде жергілікті модельдер бір-бірімен үйлесімді және жаһандық модельге біріктірілген кезде ешқандай клиенттік деректер басымдыққа ие болмайды.

Нәтижелер және оларды талқылау.

Бұл бөлімде жүргізілген эксперимент нәтижесінде тандалған гипер параметрлері, кателік функциясы, бағалау көрсеткіштері және қолданылатын бағдарламалық жасақтама

мен аппараттық орта туралы қосымша ақпарат берілген. Distilbert моделі HuggingFace Transformers кітапханасын пайдаланып PyTorch шеңберінде оқытылды. Қателік функциясы ретінде CrossEntropyLoss қолданылды және оңтайландыру Adam оптимизаторының көмегімен жүзеге асырылды. Сервердегі жаһандық модель жаңартулары FedAvg алгоритмін қолдана отырып біріктірілді.

Федеративті оқыту 7 раундты қамтыды, олардың әрқайсысында барлық 3 клиент 3 дәуірден өтті. Токендер тізбегінің максималды ұзындығы 128, батч өлшемі 16 және оқу жылдамдығы $2e-5$ болды. Орнатылған параметрлердің толық көрсеткіштері 2-кестеде берілген.

Кесте 2 – Параметрлердің толық көрсеткіштері

Параметрлер тізімі	Мәні
Клиенттер саны	3 клиент
Біріктіру раундтарының саны	7 раунд
Оқыту дәуірі	3 дәуір
Оқу жылдамдығы	$2e-5$
Батч өлшемі	16 батч
Градиентті оңтайландырғыш	Adam
Шығын функциясы	Cross-entropy
Модель	DistilBERT
Фреймворк	PyTorch + HuggingFace Transformers
Біріктіру	FedAvg
Деректер жиынын бөлу	IID
Бағалау көрсеткіші	F1-score, Accuracy, Precision, Recall

3-кестеде көрсетілгендей, модель барлық негізгі көрсеткіштер бойынша екі класс үшін де (0 және 1) жақсы нәтижелерге қол жеткізгенің көрсек болады. Көрсеткіштердің мұндай нәтижесі модельдің бинарлы классификация негізінде дәл тану қабілетінің жоғарылығын көрсетеді. Сонымен қатар, macro avg және weighted avg көрсеткіштерінің нәтижесі класстардың біркелкі бөлінгенін растайды. Оқытылған модельдер мен нәтижелер Google Drive-та сақталды және оларды келесі эксперименттерде қайта пайдалануға немесе талдау жұмыстарын жүргізуге болады.

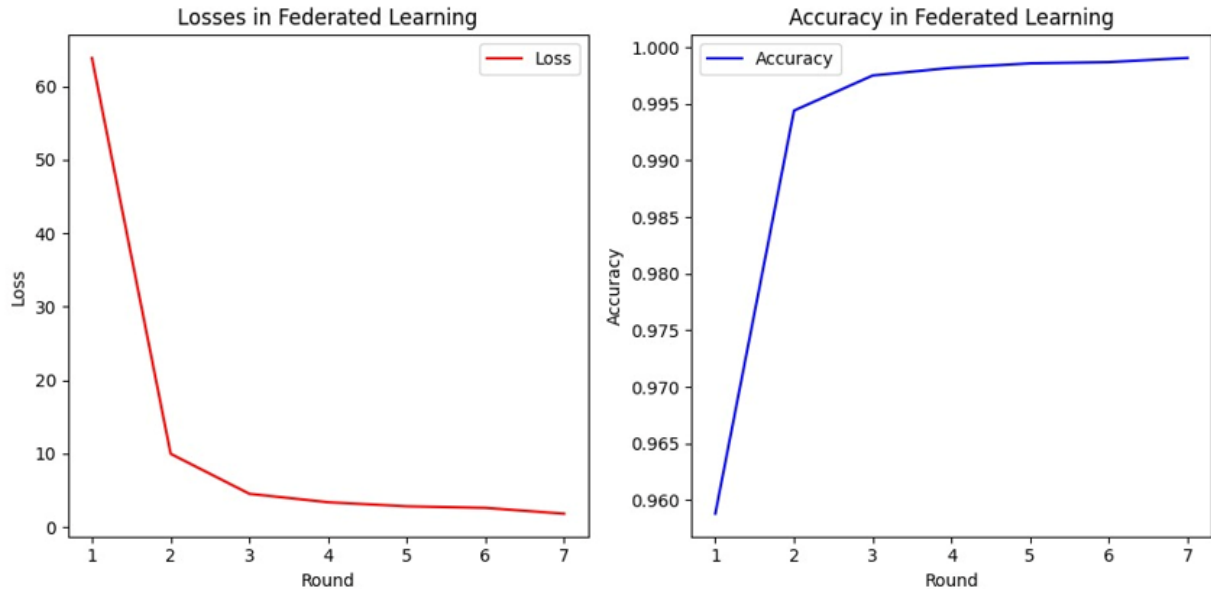
Кесте 3 – Негізгі көрсеткіштер бойынша нәтижелер

	precision	recall	f1-score	Support
0	0.93	0.96	0.94	36786
1	0.96	0.93	0.94	36786
accuracy			0.95	73572
macro avg	0.95	0.93	0.94	73572
weighted avg	0.95	0.94	0.95	73572

Бұл нәтижелер ұсынылған DistilBERT моделі негізіндегі федеративті оқыту әдісін агрессивті мазмұнды анықтауда қолдануға болатынын растайды, бұл тек жоғары дәлдікті ғана емес, сонымен қатар нақты ортада сенімділікті қамтамасыз етеді. 5-суреттен көрініп тұрғандай, модельді федеративті ортада оқыту барысында қателік функциясының төмендеуі және дәлдіктің жоғарылауы графиктерімен анық көрсетілген.

Сол жақтағы график федеративті оқытудың әрбір раундынан кейін loss мәні қалай өзгергенін көрсетеді. Мәселен бірінші раундта 60-тан 10-ға дейін түсті. Келесі раундтарда қателік функциясының мәні біртіндеп төмендей береді және 2-ден аз минималды мәнге жетеді. Оң жақтағы график модельдің дәлдігі қалай өзгергенін көрсетеді:

- бірінші раундта дәлдік шамамен 0,96 құрайды, бұл модельдің дәл болжамдар жасау мүмкіндігін көрсетеді;
- екінші және үшінші раундтарда дәлдік тез артып, 0,995-тен асады;
- 4-тен 7-ге дейін дәлдік мәні 0,999 деңгейіне жетеді, бұл модельдің жоғары сапаға қол жеткізетіндігін және енді маңызды түзетулерді қажет етпейтіндігін көрсетеді.



Сурет 5 – Федеративті оқытудағы қателік мен дәлдік графигі

Бинарлы классификация моделінің сапасын одан әрі бағалау үшін confusion matrix и ROC қолданылды, олардың әрқайсысы болжамдардың қаншалықты жақсы екенін көрсетеді.

ROC қисығы осьтер бойымен құрылады [12]:

- x-oci: False Positive Rate (жалған оң нәтижелердің үлесі),

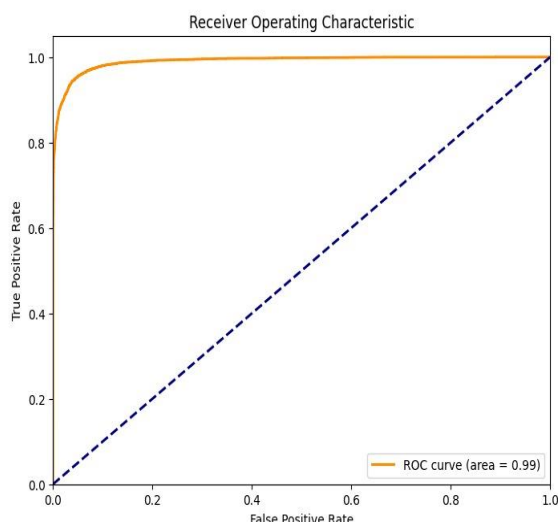
$$FRP = \frac{FP}{FP + TN} \quad (4)$$

- y-oci: True Positive Rate (шынайы оң нәтижелердің үлесі),

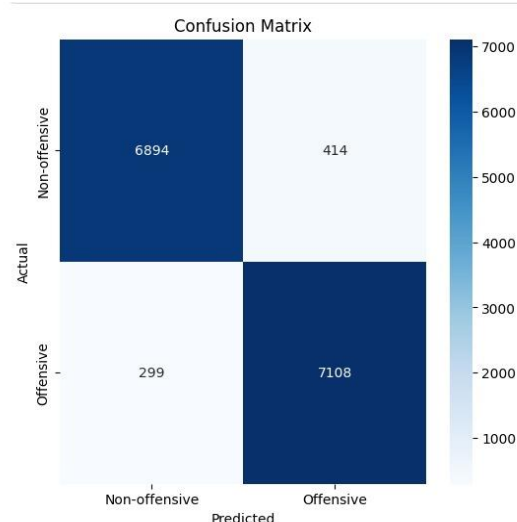
$$TRP = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

6-суретте модельдің әртүрлі шектерде оң және теріс класстарды ажырату мүмкіндігін көрсететін ROC (Receiver Operating Characteristic) қисығы көрсетілген. Сызық графиктің жоғарғы сол жақ бұрышына неғұрлым жақын болса, классификатор соғұрлым жақсы жұмыс істейді. Біздің жағдайда модель идеалды мінез-құлықты көрсетеді, өйткені ROC қисығы сол және жоғарғы жиектерге толығымен бағытталған. Ең маңызды көрсеткіш – AUC (Area Under Curve) – 0.99, бұл модельдің хабарламаларды ажырату қабілетінің жоғары екендігін көрсетеді.

Confusion Matrix модельді екі класс бойынша жіктеу нәтижелері туралы егжей-тегжейлі ақпарат береді. 7-суретте confusion matrix визуализациясы берілген, онда нақты сыныптар тігінен және модель болжаған сыныптар көлденеңінен көрсетілген. Нәтижесінде: 6894 агрессивті мазмұн дұрыс жіктелді; 7108 агрессивті емес мазмұн дұрыс анықталған; 414 агрессивті емес мысалдар қате түрде агрессивті деп жіктеледі; 299 агрессивті хабарлама қате түрде агрессивті емес деп жіктеледі.



Сурет 6 – Агрессивті сөйлемдерді классификациялау үшін ROC-қисық



Сурет 7 – Классификациялауға арналған қателік матрицасы

Эксперимент нәтижелері FedAvg алгоритмін және деректерді біркелкі (IID) бөлу әдісін қолдана отырып, федеративті оқыту жағдайында distilbert модельі негізіндегі ұсынылған архитектура жоғары дәлдік пен тұрақтылықты көрсетеді. Барлық негізгі көрсеткіштердің мәндері – accuracy, precision, recall және F1 – 0.94-тен асады, ал ROC қисығының көрсеткіші (AUC = 0.99) модельдің класстарды ажырата білу қабілетін растайды.

Қорытынды.

Бұл жұмыста агрессивті мазмұнды анықтау тапсырмасы үшін федеративті оқытуды пайдалану мүмкіндігі зерттелді. Бұл міндет әсіресе интернетте қауіпсіз және этикалық тұрақты байланысты қамтамасыз ету қажет цифрландыру дәуірінде өзекті болып табылады. Негізгі мәселелердің бірі – құпиялылықты бұзбай және деректерді орталықтандырылған серверлерге тасымалдамай, пайдаланушы мазмұнын модерациялау қажеттілігі. Бұл мәселені шешу үшін федеративті оқыту әдісі ұсыналады.

Негізгі архитектура ретінде DistilBERT трансформаторлық моделі таңдалды, ол толық BERT модельдерімен салыстырғанда есептеу шығындары төмен және жоғары дәлдік пен өнімділікті біріктіреді. Модель FedAvg алгоритмін пайдаланып, үш клиент арасында деректерді біркелкі (IID) үйлестіру арқылы федеративті оқыту орындалды.

Эксперимент нәтижелері ұсынылған тәсілдің жоғары тиімділігін растады. Модель 94% жалпы дәлдікке қол жеткізді, әр класс үшін F1 ұпайы 0,94 көрсеткішіне тең болды. Штатасу матрицасы жалған оң және жалған теріс мәндердің ең аз санымен болжаулардың теңгерімді таралуын көрсетті. Сонымен қатар, оқыту динамикасының графиктері агрегацияның бірінші раундтарынан бастап қателік функциясының тұрақты төмендеуін және дәлдіктің өсуін көрсетті, бұл модельдің жылдам конвергенциясы мен тұрақтылығын көрсетеді.

Алынған нәтижелер көрсеткендей, аздаған оқу раундтары мен клиенттер арасында параметрлердің ең аз алмасуымен де жаһандық модельді өте тиімді оқытуға болады. Ол жоғары классификация сапасын сақтайды және әртүрлі қатысушылардан алынған білімді жақсы қорытындылайды. Бұл жағдайда деректер пайдаланушыларда қалады және серверге берілмейді, бұл ақпараттың ағып кету қаупін айтарлықтай төмендетеді.

Дегенмен, жұмыста шектеулер бар: зерттеу тек деректердің біркелкі (IID) үлестіру жағдайында жүргізілді. Болашақта біркелкі емес (non IID) үлестірімі бар неғұрлым нақты сценарийлерді зерттеу, сондай-ақ басқа агрегаттау алгоритмдерін сынау (FedAdam, FedYogi) және нақты жағдайларға жақындау үшін клиентте санын көбейту жоспарлануда.

Әдебиеттер тізімі

1. Khan, Y., Sánchez, D., & Domingo-Ferrer, J. (2024). Federated learning-based natural language processing: A systematic literature review. *Artificial Intelligence Review*, 57, 320. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10970-5>
2. Zhang, H., Bosch, J., & Holmström Olsson, H. (2025). Enabling efficient and low-effort decentralized federated learning with the EdgeFL framework. *Information and Software Technology*, 178, Article 107600. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2024.107600>
3. Kumarappan, J., Rajasekar, E., Vairavasundaram, S., & Others. (2024). Federated learning enhanced MLP–LSTM modeling in an integrated deep learning pipeline for stock market prediction. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 17, 267. <https://doi.org/10.1007/s44196-024-00680-9>
4. Wang, X., Li, H., Chen, K., & Shou, L. (2023). FedBFPT: An efficient federated learning framework for BERT further pre-training. *Thirty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-23)* (pp. 4344–4352).
5. Sarhan, M., Layeghy, S., Moustafa, N., & Portmann, M. (2023). Cyber threat intelligence sharing scheme based on federated learning for network intrusion detection. *Journal of Network and Systems Management*, 31(3). <https://doi.org/10.1007/s10922-022-09691-3>
6. Sahu, A., El-Ebiary, Y. A. B., Saravanan, K. A., Thilagam, K., Devi, G. R., Gopi, A., & Taloba, A. I. (2024). Federated LSTM model for enhanced anomaly detection in cyber security: A novel approach for distributed threat. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(6), 1237–1249.
7. Olanrewaju-George, B., & Pranggono, B. (2025). Federated learning-based intrusion detection system for the Internet of Things using unsupervised and supervised deep learning models. *Cyber Security and Applications*, 3, 100068. <https://doi.org/10.1016/j.csa.2024.100068>
8. Heidari, A., Navimipour, N. J., Dag, H., Talebi, S., & Unal, M. (2024). A novel blockchain-based deepfake detection method using federated and deep learning models. *Cognitive Computation*, 16, 1073–1091. <https://doi.org/10.1007/s12559-024-10255-7>
9. Schumann, G., Awick, J.-P., & Marx Gómez, J. C. (2023, September). *Natural language processing using federated learning: A structured literature review*. In *2023 International Conference on AI-Based Things*, (pp. 100–112). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AIBThings58340.2023.10292481>
10. Khan, Y., Sánchez, D., & Domingo-Ferrer, J. (2024). Federated learning-based natural language processing: A systematic literature review. *Artificial Intelligence Review*, 57, Article 320. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10970-5>
11. Kairouz, P., McMahan, H. B., Avent, B., Bellet, A., Bennis, M., Bhagoji, A. N., Bonawitz, K., ... & Zhao, S. (2021). Advances and open problems in federated learning. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 14(1–2), 1–210. <https://doi.org/10.1561/22000000083>
12. Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>

References

1. Khan, Y., Sánchez, D., & Domingo-Ferrer, J. (2024). Federated learning-based natural language processing: A systematic literature review. *Artificial Intelligence Review*, 57, 320. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10970-5>
2. Zhang, H., Bosch, J., & Holmström Olsson, H. (2025). Enabling efficient and low-effort decentralized federated learning with the EdgeFL framework. *Information and Software Technology*, 178, Article 107600. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2024.107600>
3. Kumarappan, J., Rajasekar, E., Vairavasundaram, S., & Others. (2024). Federated learning enhanced MLP–LSTM modeling in an integrated deep learning pipeline for stock market prediction.

International Journal of Computational Intelligence Systems, 17, 267. <https://doi.org/10.1007/s44196-024-00680-9>

4. Wang, X., Li, H., Chen, K., & Shou, L. (2023). FedBFPT: An efficient federated learning framework for BERT further pre-training. *Thirty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-23)* (pp. 4344–4352).

5. Sarhan, M., Layeghy, S., Moustafa, N., & Portmann, M. (2023). Cyber threat intelligence sharing scheme based on federated learning for network intrusion detection. *Journal of Network and Systems Management*, 31(3). <https://doi.org/10.1007/s10922-022-09691-3>

6. Sahu, A., El-Ebiary, Y. A. B., Saravanan, K. A., Thilagam, K., Devi, G. R., Gopi, A., & Taloba, A. I. (2024). Federated LSTM model for enhanced anomaly detection in cyber security: A novel approach for distributed threat. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(6), 1237–1249.

7. Olanrewaju-George, B., & Pranggono, B. (2025). Federated learning-based intrusion detection system for the Internet of Things using unsupervised and supervised deep learning models. *Cyber Security and Applications*, 3, 100068. <https://doi.org/10.1016/j.csa.2024.100068>

8. Heidari, A., Navimipour, N. J., Dag, H., Talebi, S., & Unal, M. (2024). A novel blockchain-based deepfake detection method using federated and deep learning models. *Cognitive Computation*, 16, 1073–1091. <https://doi.org/10.1007/s12559-024-10255-7>

9. Schumann, G., Awick, J.-P., & Marx Gómez, J. C. (2023, September). *Natural language processing using federated learning: A structured literature review*. In *2023 International Conference on AI-Based Things*, (pp. 100–112). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AIBThings58340.2023.10292481>

10. Khan, Y., Sánchez, D., & Domingo-Ferrer, J. (2024). Federated learning-based natural language processing: A systematic literature review. *Artificial Intelligence Review*, 57, Article 320. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10970-5>

11. Kairouz, P., McMahan, H. B., Avent, B., Bellet, A., Bennis, M., Bhagoji, A. N., Bonawitz, K., ... & Zhao, S. (2021). Advances and open problems in federated learning. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 14(1–2), 1–210. <https://doi.org/10.1561/22000000083>

12. Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>

ФЕДЕРАТИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ АГРЕССИВНОГО КОНТЕНТА: ПОДХОД НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ТРАНСФОРМАТОРА

Аннотация. Стремительное развитие цифровых коммуникаций привело к увеличению количества постов агрессивного содержания в Интернете. Автоматическое обнаружение такого контента является одной из самых актуальных проблем нашего времени. Однако традиционные подходы, основанные на сборе данных на центральном сервере, могут поставить под угрозу конфиденциальность личной информации. Одним из способов решения этой проблемы является использование метода федеративного обучения. Данный метод подразумевает индивидуальное обучение модели на устройстве каждого пользователя, без отправки данных на центральный сервер. В ходе исследования был проведен обзор литературы научных работ и проанализирован опыт использования метода федеративного обучения. В качестве набора данных использовался специальный корпус, состоящий из 73 572 записей агрессивных и неагрессивных текстов. Для обучения модели использовалась модель DistilBERT, а набор данных был разделен между тремя клиентами, каждый из которых обучал только свои собственные записи по отдельности. В конце каждого раунда сервер использует алгоритм FedAvg для объединения параметров модели, предоставленных всеми клиентами на сервере, создавая общую глобальную модель. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что метод федеративного

обучения имеет два важных преимущества: во-первых, он работает с высокой точностью, а во-вторых, обеспечивает надежность и конфиденциальность информации.

Ключевые слова: федеративное обучение, обработка естественного языка, DistilBERT, FedAvg, сохранение конфиденциальности, агрессивный контент, классификация.

A TRANSFORMER MODEL APPROACH TO FEDERATED LEARNING FOR AGGRESSIVE CONTENT CLASSIFICATION TASKS

Abstract. The rapid development of digital communication has led to an increase in the number of offensive postings on the Internet. Automatic detection of such content is one of the most pressing problems of our time. However, traditional approaches based on collecting data on a central server can compromise the privacy of personal information. One way to address this issue is to use federated learning. This method involves individual model training on each user's device without sending data to a central server. In the course of the study, a literature review of scientific papers was conducted and experiences with the federated learning method were analyzed. A special corpus consisting of 73,572 recordings of aggressive and non-aggressive texts was used as a dataset. The DistilBERT model was used to train the model, and the dataset was divided among three clients, each of which trained only their own recordings separately. At the end of each round, the server uses the FedAvg algorithm to combine the model parameters provided by all of the clients on the server to create a common global model. Based on the results, it can be concluded that the federated learning method has two important advantages: first, it works with high accuracy, and second, it ensures the reliability and confidentiality of information.

Keywords: federated learning, natural language processing, DistilBERT, FedAvg, privacy, aggressive content, classification.

Авторлар туралы мәлімет

Омар Айым Бекболатқызы	Техника ғылымдарының магистрі, «Киберқауіпсіздік және криптология» кафедрасының докторанты, Ақпараттық технологиялар факультеті, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: aiym.omar98@gmail.com
Мусиралиева Шынар Женисбековна	PhD, профессор, «Киберқауіпсіздік және криптология» кафедрасының меңгерушісі, Ақпараттық технологиялар факультеті, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: mussiraliyevash@gmail.com

Сведение об авторах

Омар Айым Бекболатқызы	Магистр технических наук, докторант кафедры «Кибербезопасность и криптология», Факультет информационных технологий, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан, E-mail: aiym.omar98@gmail.com
<u>Мусиралиева Шынар Женисбековна</u>	PhD, профессор, заведующая кафедрой «Кибербезопасность и криптология», Факультет информационных технологий, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан, E-mail: mussiraliyevash@gmail.com

Information about the authors

Omar Aiym	Master of Technical Sciences, PhD student at the Department of Cybersecurity and Cryptology, Faculty of Information Technologies, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: aiym.omar98@gmail.com
Mussiraliyeva Shynar	PhD, Professor, Head of the Department of Cybersecurity and Cryptology, Faculty of Information Technologies, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: mussiraliyevash@gmail.com



ӘОЖ 004.932.2

ҒТАХА 81.93.29

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_9

А.Т.Кубигенова^{1*}, А.У.Ақтаева², А.А.Шарипбай³, В.А.Сухомлин⁴, Р.Н.Молдашева⁵

¹С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Астана қ., Қазақстан

² А.Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті,
Көкшетау қ., Қазақстан Республикасы

³Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Астана қ., Қазақстан Республикасы

⁴ М.В.Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университеті,
Мәскеу қ., Ресей Федерациясы

⁵Х. Досмұхамедов атындағы Атырау университеті,
Атырау қ., Қазақстан Республикасы

¹E-mail: akku_kubigenova@mail.ru *

ҮЛКЕН ДЕРЕКТЕР ТЕХНОЛОГИЯСЫНА ШОЛУ

Аңдатпа. АТ саласындағы үрдістер үнемі өзгеріп отырады және жаңа оқиғаларды алдын ала болжау ұйымның цифрлық ресурстарды, соның ішінде үлкен деректерді басқарудағы сәттілігінің негізгі факторы болып табылады. Бұл зерттеудің мақсаты нақты уақыт режимінде қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін үлкен деректерді зерттеу және талдау.

Библиометриялық талдау нәтижесінде зерттеуге қатысты кілт сөздер енгізілген 137 ақпарат көзінен алынған 323 ғылыми мақала алынды. Зерттеуге журналдық мақалалар, кітаптардың бөлімдері және патенттер кірді. Ғылыми мақалалар Scopus және WoS дерекқорларында алғашқы және қайталама кілт сөздер бойынша сұратылды. Зерттеуде келесі әдістер қолданылды: (а) 2013-2023 жылдар аралығында жарияланған мақалаларға негізделген жүйелі әдеби шолу және (б) 2000-2023 жылдар аралығында мақалаларға библиометриялық талдау жүргізілді, RStudio және Bibliometrix бағдарламалары қолданылды.

Жүргізілген талдау негізінде авторлар алдағы онжылдықтарда цифрлық қоғамның іскерлік әлемі адам мінез-құлқы мен жасанды интеллект туралы терең білімге негізделген киберқауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін үлкен деректерді өңдеуге бағытталған стратегиямен анықталатынын қорытындылайды. Бұл талдау техникалық мамандарға цифрлық қоғамдағы АТ және үлкен деректерді енгізуге арналған жаңа технологиялық шешімдерді негіздеу үшін қолданылуы мүмкін, сондай-ақ үлкен деректерді қолданбалы мақсаттарда жаппай өңдеу кезінде киберқауіпсіздікті жақсарту туралы ұсыныстардың негізділігін дәлелдеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: үлкен деректер, сандық ресурстар, дерекқорлар, библиометриялық талдау, ақпараттық технологиялар, деректерді интеллектуалды талдау.

Кіріспе.

Технологиялық инновациялар мен деректерді талдау саласындағы жетістіктер, соның

ішінде үлкен деректер, компаниялар үшін ең тиімді коммуникациялық стратегияларды әзірлеуде революциялық мүмкіндіктер ашады.

Бүгінгі таңда Big Data деректерді сақтау мен өңдеудің жаңа парадигмасын ұсынады. Үлкен деректер технологиялармен және ақпараттық жүйелермен қолдау көрсетілетін деректерге негізделген талдау маңызды деректерді алуға және оларды бизнес-инсайттарға айналдыруға мүмкіндік береді. Үлкен деректерді компаниялардың қалай пайдаланатынын және олардың сандық стратегияларды қалай анықтайтынын түсіну үлкен қызығушылық тудырады және осы зерттеудің өзектілігін негіздейді.

Ақпараттық жүйелерді қорғаудың классикалық архитектуралық әдістері жаңа технологияларға, соның ішінде үлкен деректер мен деректерді талдауға қолданылмайды. Үлкен көлемдегі ақпаратты жоғары жылдамдықпен талдау деректер ағындары мен есептеу инфрақұрылымы арасындағы үздіксіз өзара әрекеттесуді талап етеді.

Ақпараттық қауіпсіздік үшін үлкен деректерді зерттеу мен талдаудың мақсаты – үлкен көлемдегі ақпаратты нақты уақытта өңдеу. Алайда, бүгінгі таңда келесі маңызды міндеттер әлі де өзекті:

1. Үлкен деректердің көзі: аналитикада қолданылатын деректердің түпнұсқалығы мен тұтастығы, өйткені үлкен деректер көзі кеңеюде.

2. Үлкен деректер ағындарындағы ақпараттың құпиялылығы.

3. Ақпаратты талдау кезінде үлкен деректер жүйелерін түсінуді жеңілдететін құралдарды визуализациялау.

Ақпараттық технологиялар саласында орын алып жатқан үдерістерді үлкен деректер технологиясын қолдану негізінде талдау ақпараттық қауіпсіздікті қамтамасыз ету жағдайларын ғана емес, сондай-ақ коммуникациядағы көптеген жағымсыз әсерлерді болдырмауға мүмкіндік береді. Үлкен деректермен жұмыс істеуге арналған жаңа АТ-мамандарын даярлау қажеттілігі өздігінен қымбат және көп шығынды талап ететін процесс болып табылады.

Бұл зерттеудің мақсаты-үлкен деректерді өңдеу және сақтау қауіпсіздігін қоса алғанда, жаңа технологиялардың маңыздылығын ескере отырып, үлкен деректердің қауіпсіздігі мен түсіну шеңберін белгілеу.

Деректерді өңдеу, сақтау және беру қауіпсіздігі үлкен деректерді зерттеудің маңызды аспектісі болып табылады. Ақпараттың құны бар және оның ағып кетуі барлық салалардағы бизнес-процестерге айтарлықтай зиян келтіруі мүмкін; АТ-қызметтері жаңа технологияларды қолдау және сүйемелдеу үшін жеткілікті әлеуетке ие болмауы мүмкін; үлкен деректер қауіпсіздігі үлкен деректер қауіпсіздігінің маңызды аспектісі болып табылады.

Осылайша, үлкен деректер жаңа технологияларды зерттеуге және кәсіпорындарды дамыту үшін ақпараттық стратегияларды алуға мүмкіндік беретін заманауи цифрлық қоғамның дамуындағы маңызды құбылыс болып табылады.

Зерттеу мәселелерін шешу үшін таңдалған әдістеме 2013-2023 жылдар аралығында жарияланған мақалаларға негізделген әдеби шолуды және 2000-2023 жылдар аралығында мақалаларға библиометриялық талдауды қамтиды.

Төртінші өнеркәсіптік революцияның цифрлық технологиялары

Өнеркәсіптік революция (ӨР) әдетте өндіріс құралдары мен өндірісті ұйымдастырудағы революциялық өзгерістерді білдіреді, нәтижесінде доиндустриалды қоғамнан индустриалды қоғамға өту жүзеге асты.

Қазіргі цифрлық қоғамда «өнеркәсіптік революция» термині әдетте техникадағы, технологиялардағы және адамның еңбек құралдарымен байланысу тәсілдеріндегі төңкерістердің әсерінен қоғамда болып жатқан сапалы өзгерістерді білдіреді.

«Өнеркәсіптік революция» түсінігін «технологиялық революция» ұғымымен жиі шатастырады. Технологиялық революцияны технологиялық парадигманың өзгеруі, өндіріс негізінде жатқан негізгі технологиялардың жиынтығы ретінде анықтауға болады.

Технологиялық революция экономиканың әртүрлі салаларында және әлеуметтік салада еңбек өнімділігін түбегейлі немесе экспоненциалды түрде арттыратын технологиялық шешімдерді жаппай қолдануға негізделген экономикалық қызметті жүргізу тәсілін сапалы өзгертуді білдіреді.

Индустрия 4.0 дамуының қозғаушы күші ендірілген жүйелерден киберфизикалық жүйелерге (КФЖ) көшуі.

Енгізілген жүйелер – әртүрлі басқару объектілеріне орнатылған орталық басқару блоктары.

Киберфизикалық жүйелер – виртуалды және физикалық әлемдерді байланыстыратын, интеллектуалды объектілердің интернетті, желілерді және деректерді пайдалана отырып, бір-бірімен өзара әрекеттесуіне мүмкіндік беретін жаңа технологиялардың (enabling technologies) жиынтығы.

Industry 4.0 «Болашаққа арналған жоспар» құжаты сонымен қатар енгізілген жүйелерден киберфизикалық жүйелерге көшуді төртінші өнеркәсіптік революция деп атайды.

Төртінші өнеркәсіптік революцияның негізгі принциптері. Өндіріс цифрландыру жағдайында машиналардың, өндірістік жүйелер мен жабдықтардың өзара байланысы арқылы бизнес-процестерді өздігінен бақылау және басқару үшін интеллектуалды желілерді құруға мүмкіндік беретіні туралы идеяны қолдайды.

Цифрлық технологиялар – төртінші өнеркәсіптік революцияның негізгі қозғаушы күші. Заттар интернеті, жасанды интеллект, машиналық оқыту және үлкен деректер сияқты концепциялар деректер көлемін айтарлықтай ұлғайтуға әкелетін цифрлық технологияның кейбір аспектілері болып табылады, бұл сақтау сыйымдылығын арттыруға және машиналық оқытудағы жетістіктерге әкеледі [1].

Рейнсель және т.б. 2018 жылы жасалған, жиналған немесе репликацияланған деректер көлемі 33 зеттабайттан 2025 жылға қарай 175 зеттабайтқа дейін өсетінін болжады. Data Age Report мәліметтері бойынша 2020 жылы адамзат шамамен 51 зеттабайт ақпарат қалыптастырды. 2025 жылға қарай бұл деректер көлемі жылына 175 зеттабайтқа дейін өседі. (1-сурет).



1 сурет – Қайталанатын Big Data көлемі

Индустрия 4.0 қолданылатын жаңалықтардың бірі - Big Data деп аталатын деректердің жинақталуы. Үлкен деректерді жинақтау – бұл сандық қоғам жағдайында бизнес - мақсаттарды шешуге мүмкіндік беретін коммерциялық міндет.

Зерттеу материалдары мен әдістері.

Үлкен деректер концепциясы жақында пайда болды: компаниялар алғашқы электронды есептеуіш машиналар пайда болған өткен ғасырдың ортасынан бастап

деректерді жинай бастады. Компьютерлер мен сақтау жүйелерінің қымбаттығына байланысты деректердің өсуі баяу болды.

Осылайша, "үлкен деректер" - бұл бастапқы сақтау ресурстары ретінде пайдаланылатын ақпараттық жүйелер мен дерекқорлар белгілі бір уақыт ішінде үлкен көлемдегі деректерді ғана емес, сонымен қатар нақты операцияларды да сақтай алатынын білдіретін жалпы термин.

Бүгінгі таңда қол жетімді құралдар үлкен деректерге тән барлық мәселелерді шеше алмайды. Дегенмен, олар аз уақыт ішінде әртүрлі деректерді өңдеуді біршама жеңілдетуге мүмкіндік береді.

Үлкен деректер тым үлкен және дәстүрлі әдістермен өңделмейтін деректер жиынын білдіреді, бұл өңдеудің жаңа технологияларын сақтау, басқару, талдау және визуализацияның озық және бірегей технологияларын талап етеді. Үлкен деректердің үш сипаттамасы: көлем, әртүрлілік және жылдамдық.

Деректер көлемі әр түрлі көздерден секунд сайын жасалатын деректер көлемін білдіреді. Үлкен деректердің көлемі деректердің уақыты мен түрі сияқты факторларға байланысты. Қазіргі уақытта үлкен деректер деп саналатын нәрсе болашақта шекке жетпеуі мүмкін, өйткені сақтау сыйымдылығы артады және одан да үлкен көлемдегі деректер жиналуы мүмкін.

Сонымен қатар, бірдей өлшемдегі екі деректер жиынтығы олардың түріне байланысты деректерді басқарудың әртүрлі әдістерін қажет етуі мүмкін, мысалы, мәтіндік деректер және бейне деректер.

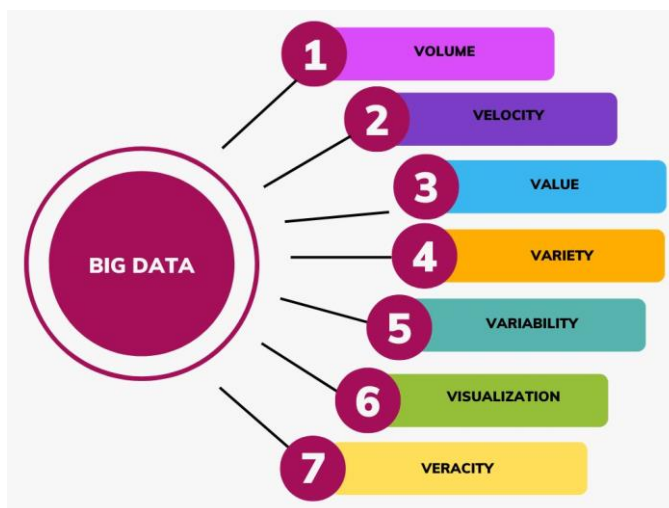
Жылдамдық көлеммен тығыз байланысты. Деректерді алу жылдамдығы неғұрлым жоғары болса, соғұрлым жасалған көлем үлкен болады. Бұл сипаттама ақпаратты ғаламтор арқылы беру және тарату жылдамдығына да, нақты уақыт режимінде деректерді талдауға қажетті жылдамдыққа да қатысты. Компаниялардың тұтынушылар деректерін алу, талдау және пайдалану жылдамдығы оларға бәсекелестерінен артықшылық береді. Ал нарықтағы ақпараттың көлемі мен әртүрлілігін ескере отырып, тәжірибе көрсеткендей, бәсекелестік артықшылық бірнеше минут ішінде жоғалуы мүмкін. Әртүрлілік деректер жиынының құрылымдық біркелкі еместігін білдіреді.

Датчиктер мен интеллектуалды құрылғылардың пайда болуымен деректердің күрделілігі артып, тек дәстүрлі деректерді ғана емес, сондай-ақ өңделмеген, жартылай құрылымдалған және құрылымдалмаған деректерді де қамтиды.

Дюкандж және т.б. бұл олқылықты жою үшін жаңа шешімдер қажет екенін мойындайды, өйткені дәстүрлі технологиялар құрылымдалмаған деректермен тиімді жұмыс істей алмайды.

Дегенмен, көлем, жылдамдық және әртүрлілік – бұл үлкен деректердің ерекше сипаттамаларының кейбіреулері ғана.

Тернер және т.б. көлем, әртүрлілік және жылдамдықты үлкен деректердің негізгі сипаттамалары деп санайды. (2-сурет).



2 сурет – Үлкен деректердің негізгі параметрлері

Сандық ортадағы ақпарат көздерінің көбеюі деректердің сенімділігі мен сенімділік деңгейін талдауды қажет етеді. Үлкен деректер дәуірінде компаниялар деректердің белгісіздігін мойындауы, оған бейімделуі және оны пайдалану жолдарын анықтауы керек [2].

Сенімділік алынған мәліметтердің сапасы мен сенімділігін білдіреді. Бұл аспект үлкен деректер мен қауіпсіздік әлемінде іргелі болып табылады, өйткені деректерге қол жеткізген кез келген адам қол жеткізетін деректердің тұтастығын тексеруге жауапты. Жалған деректер талдаудағы қателерге әкелуі мүмкін, бұл өз кезегінде компанияның стратегиясына қауіп төндіретін нашар шешімдерге әкелуі мүмкін.

Үлкен деректер сенімді нәтижелерді алу үшін арнайы құралдар мен үлкен алгоритмдерді қажет етеді.

Үлкен деректердің көлемі өскен сайын оның ішкі мәнін және оны талдау компанияға қалай пайда әкелетінін ескеру қажет. Мәселе маңызды емес немесе маңызды емес деректерді жою және қалған деректердің кәсіпорын үшін пайдалы болуын қамтамасыз ету болып табылады.

Ең тиімді үлкен деректер шешімдері бизнес талаптарын анықтаудан басталатын, содан кейін бизнес мүмкіндігін қолдау үшін инфрақұрылымды, деректер көздерін, процестер мен мүмкіндіктерді бейімдейтін шешімдер болып табылады.

Үлкен деректер компанияда неғұрлым көп ақпарат болса, соғұрлым ол сенімдірек болады және жаңа түсініктерге ие болып, тұтынушылардың іс-әрекеті туралы болжам жасай алады деген принцип бойынша жұмыс істейді.

Үлкен деректердің сандық ресурстарын басқару стратегиясы

Үлкен деректер цифрландыру арқылы басқару стратегияларын өзгертеді және «Өнеркәсіптік революция 4.0» деп аталатын бизнестің бәсекеге қабілеттілігінің жаңа шекарасын білдіреді. Үлкен деректер технологиясы цифрлық ресурстарды басқарудың дәлірек, мақсатты және креативті стратегияларын қолдай алады. Тұжырымдамалық модель NBDRA (NIST Big Data Reference Architecture) - бұл үйлесімділік интерфейстерімен байланысты бес логикалық функционалды компоненттерден тұратын үлкен деректер жүйесі.

Бүкіл әлемде жаңа бизнес - модельдерді енгізу және бәсекелестік артықшылықтардың жаңа көздерін дамыту үшін үлкен деректер қолданыла бастады. Бәсекелестік артықшылықтың жаңа көзі - клиентке бағдарлану: кез келген басқа компанияға қарағанда оларға жақсырақ қызмет ету үшін олардың қажеттіліктерін терең түсіну.

Компаниялар өз ресурстарын шоғырландырып, қажетті құзыреттердің бірыңғай жүйесін құруы керек. Қажетті құзыреттердің бірыңғай жүйесі цифрлық активтерді басқару стратегиясында жаңа мүмкіндіктерді пайдалану және клиенттер мен мүдделі тараптар үшін пайда алу үшін берік негіз қалайды.

Бұл ретте компаниялар цифрлық деректердің қауіпсіздігі мен құпиялылығына қатысты ықтимал проблемаларды азайту үшін инновациялар мен пайда табуды тұтынушылардың күтулерімен және этикалық нормалармен біріктіруі керек.

Үлкен деректер технологияларын қорғаудың қолданыстағы тәсілдері, әдетте, бірыңғай қауіпсіздік тұжырымдамасы болмаған кезде әртүрлі құралдарды пайдалануға негізделген.

Бүгінгі таңда жинау, біріктіру, сақтау және талдау сияқты бірегей техникалық сипаттамалары бар үлкен деректерді, құрылымдалған және құрылымданбаған деректерді қорғаудың құрылымдық процедуралары мен әрекеттерін сипаттайтын нақты тұжырымдалған әдістеме жоқ. Жинау мен беруден бастап талдауға және қоймаға орналастыруға дейін өңдеудің барлық кезеңдерінде маңызды деректерді қорғауға бағытталған тәсіл қажет.

Мысалы, NIST бастапқыда деректерді өңдеудің барлық техникалық деңгейлерінде деректердің қауіпсіздігі мен құпиялылығына назар аударуды ұсынды, бұл деректермен өзара әрекеттесудің бес негізгі интерфейсіні қамтиды.

Үлкен деректер жүйелерінің қауіпсіздігіне жеткіліксіз көңіл бөлінеді. Көптеген жобалар ақпараттық қауіпсіздік мәселелерін есепке алмастан әзірленеді және жүзеге асырылады, бұл ерте ме, кеш пе, қауіпсіздік жүйелерін енгізудің уақыты мен құнын айтарлықтай арттырады, кейде бизнес үшін аса ауыр зардаптарға әкеледі. Үлкен деректер жобаларын жүзеге асыру кезінде қауіпсіздік мәселелері ең басынан бастап қарастырылуы керек. Әйтпесе, жоба бизнес мүмкіндігінен жаңа бизнес тәуекеліне айналуы мүмкін.

Нәтижелер және олардың талқылануы.

Әдебиетке жүйелі шолу жасау. Цифрлық деректерді (ресурстарды) басқару стратегияларында төртінші технологиялық революцияның жаңа технологияларын қолдануға деген аңғалдық кейбір ұйымдардың цифрлық стратегияларды дамытудағы осы технологиялардың мүмкіндіктері туралы жеткіліксіз хабардар болуын көрсетуі мүмкін.

Бұл жұмыстың мақсаты – компаниялардың үлкен деректерді пайдалану дәрежесін және олардың цифрлық стратегияларына әсерін зерттеу және талдау. Шолуды басшылыққа алу үшін келесі сұрақ қойылды: Үлкен деректер қауіпсіздігі мәселелерінің цифрлық активтерді басқару стратегияларына әсері қандай?

Цифрлық ресурстарды басқару стратегияларына қатысты үлкен деректер туралы ағымдағы түсінікті нығайту және осылайша қойылған сұрақтарға жауап беру үшін біз алдымен әдебиеттерге жүйелі шолу жасап, содан кейін библиометриялық шолу жасауды шештік.

Жүйелі шолулар, дәстүрлі шолулар сияқты, білімдегі олқылықтарды анықтауға көмектеседі. Алайда, әдебиеттерді жүйелі түрде шолуға қызығушылық - бұл процестің объективтілігі мен ашықтығын көрсететін бейтарап, ұтымды және стандартталған технологиялық процесс.

Тиімді шолу білімді ілгерілету үшін күшті негіз береді, теорияның дамуын жеңілдетеді, көп зерттеулер бар аймақтарды жабады және зерттеу қажет аймақтарды ашады. Осы себепті ғылыми қатаңдықты қамтамасыз ету және біржақтылықты азайту үшін жүйелі шолу процесін қайталауға болады.

Әдебиеттерді жүйелі шолу процесі медицина ғылымынан бастау алады және жылдар өткен сайын басқа пәндер бойынша білім құруға, әсіресе гуманитарлық зерттеулерге инвестиция салынды, бұл әдіс жүргізілетін зерттеулерді кластерлеу үшін маңызды бола бастады [3].

Зерттеу сұрағының тұжырымы. Зерттеулерді іріктеу процесі 2023 жылдың қаңтарында өтті және Scopus мәліметтер базасында әдебиеттерді іздеу жүргізілді, оның барысында 137 дереккөзде 323 құжат тіркелді. Scopus дерекқорында TOPIC: ("үлкен деректер") және TOPIC: ("криптография") қолданғаннан кейін 2013 және 2023 жылдар аралығында 323 мақала алынды.

Қосу критерийлері: 2013 және 2023 жылдар аралығындағы мақалалар, аталған дерекқорларда толық оқуға қол жетімді және цифрлық стратегиялардағы үлкен деректерге баса назар аударылды. Ерекшелік критерийлері: қайталанатын мақалалар, іріктеу критерийлерімен байланысты емес зерттеулер, жүйелі шолулар мен диссертациялар, сондай-ақ қорытындысы жоқ құжаттар.

6-суретке сәйкес авторлар зерттеудің нақты бағытын анықтаудың маңыздылығын мойындайды деген қорытынды жасау керек. Сондықтан бірінші кезең зерттеу сұрақтарын тұжырымдауға арналған. Бұл сұрақ қандай зерттеулерді қосу керектігін, тиісті бастапқы зерттеулерді анықтау үшін қандай іздеу стратегиясын қолдану керектігін және әрбір зерттеу үшін қандай деректерді алу керектігін насихаттайтын шолуды бағыттайды. Әдебиетке жүйелі шолу бес кезеңге бөлінеді. Деректер 3-суретте көрсетілген.



3 сурет – Зерттеу сұрағының тұжырымы: жүйелі шолу кезеңдері

Зерттеудің орналасуы. Әдебиеттерге шолулар жасау нақты сұрақтарына сәйкес келетін зерттеулерді мүмкіндігінше табуға, таңдауға және бағалауға тырысады. Зерттеулерді жан-жақты іздеу шолу нәтижелері барлық қолда бар дәлелдерді ескеретініне және жоғары сапалы материалдарға негізделгеніне көз жеткізуге мүмкіндік береді.

Зерттеуді таңдау және бағалау. Қарастырылатын зерттеулердің тек шолу сұрағына жауап беруге қатысы бар зерттеулердің болуын қамтамасыз ету үшін іріктеу критерийлері қолданылады. Шешімдер ақпарат көздерін қосу және алып тастау себептерін дәл көрсете отырып жазылады.

Талдау және синтез. Тиісті дереккөздердің жинағын алғаннан кейін, ақпаратты талдап, қорытындылайтын уақыт келді. Бұл қадамның мақсаты-әртүрлі зерттеулерді талдау және олардың өзара байланысын сипаттау.

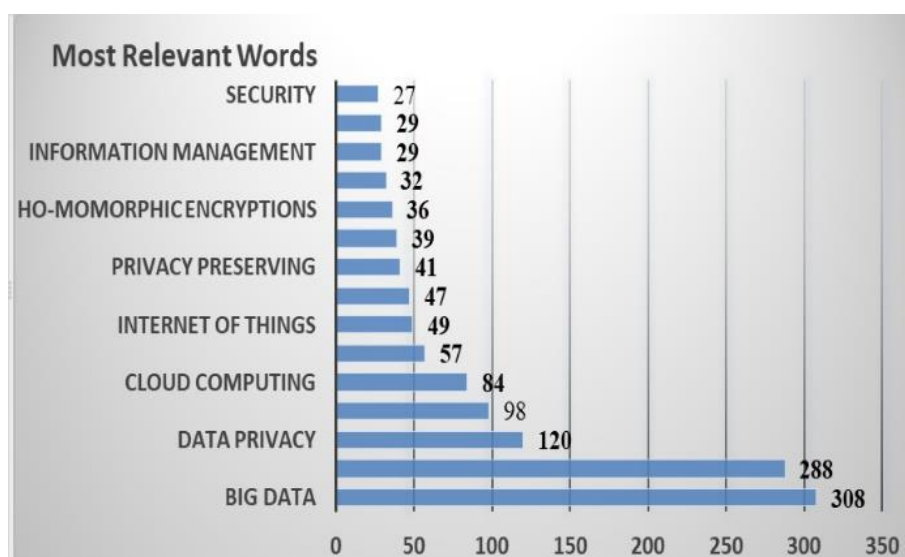
Жүйелі шолудың соңында зерттеу саласының толық жиынтық көрінісін қамтамасыз ететін барлық енгізілген зерттеулердің ақпараты көрсетіледі.

Нәтижелерді жариялау. Соңғы кезеңде алынған нәтижелер ұсынылады және талқыланады.

Осы тақырып бойынша ғылыми әдебиеттерді зерттеу кезінде үлкен деректер саласындағы зерттеушілердің қызығушылығының артуы үлкен деректердің қауіпсіздігін және олардың қолданылуын қамтамасыз ету тұжырымдамаларын ұсынатын зерттеулер мен мақалалардың көбеюі байқалды.

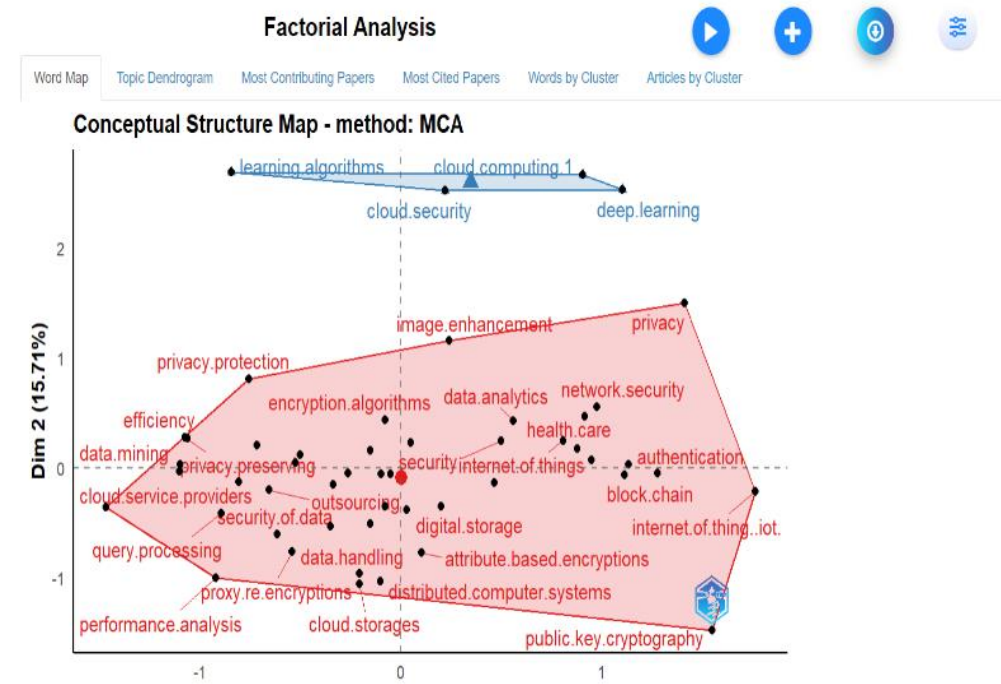
Осы тұрғыдан алғанда, бұл зерттеу цифрлық ресурстардың қауіпсіздігін басқару стратегияларында үлкен деректердің қалай қолданылатынын анықтау, талдау және сыни талқылау арқылы әдебиеттерге жалпы шолу жасауға бағытталған.

Іздеудің тиімді болуы үшін және мүмкіндігінше тиісті зерттеулерге әкелуі үшін іздеу терминдері ретінде "үлкен деректер" және "криптография" анықталды. Бұл критерийлер Зерттеудің мақсаты мен зерттеу мәселелерін ескере отырып анықталды (4-сурет).



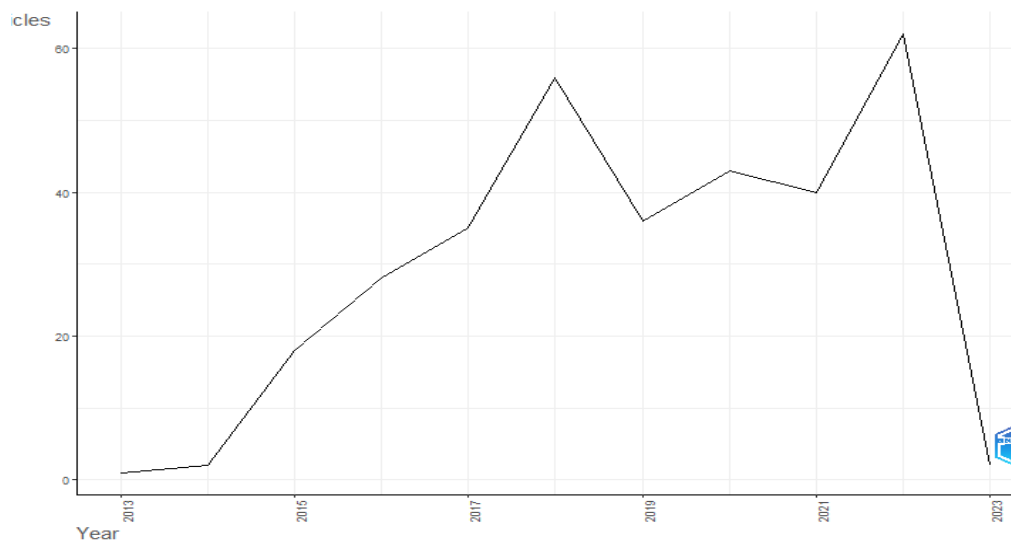
4 сурет – SCOPUS дерекқорындағы зерттеулерді іріктеу процесі

Bibliometrix бағдарламалық құралын пайдалану бірте-бірте ғылыми зерттеулердің барлық пәндеріне таралады және эмпирикалық үлеске баса назар аудару цифрлық ресурстардың үлкен, бөлшектелген және қарама-қайшы ағындарына әкелетін уақытта (5-Сурет) осы зерттеуді картаға түсіру үшін қолайлы. Желілік матрицаны құру үшін R Studio, Bibliometrix - <http://www.bibliometrix.org> бағдарламалық жасақтамасы қолданылды.



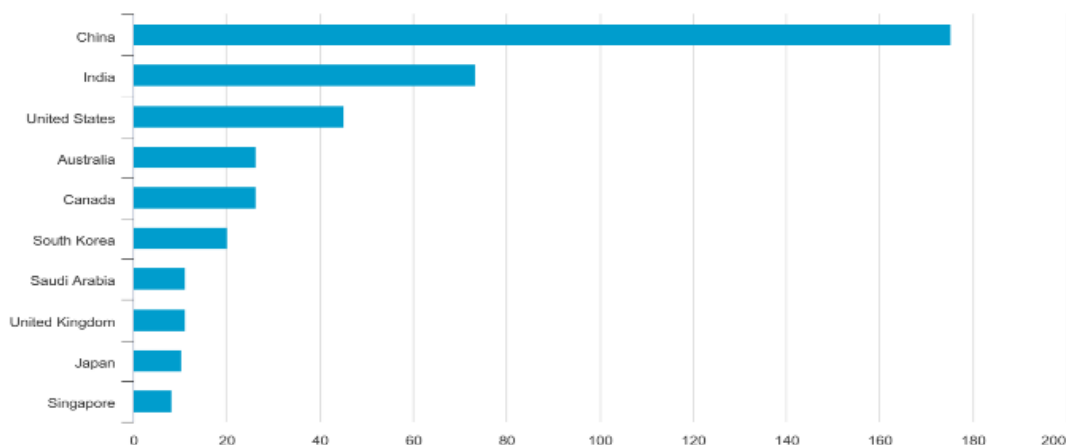
5 сурет – Факторлық талдау картасы

Келесі қадам категориялық мазмұнды талдау болды. Осы тақырып бойынша академиялық әдебиеттерді зерттеу барысында зерттеушілердің үлкен деректер саласына деген қызығушылығының артуы байқалды, өйткені үлкен деректердің цифрлық ресурстарының қауіпсіздігін басқару (үлкен деректерді өңдеу және сақтау) стратегиясының тұжырымдамаларын және олардың цифрлық ресурстарды басқаруда қолданылуын көрсететін зерттеулер мен мақалалар саны бірнеше есе өсті (6-сурет).



6 сурет – Зерттелетін салаға қызығушылықтың эволюциясы

7-сурет зерттеудің негізгі мақалаларына сәйкес авторлар желісінің географиялық таралуын көрсетеді. Элементтердің саны бойынша ең көп ұсынылған елдер Қытай (175), Үндістан (73) және Америка Құрама Штаттары (45) болып табылады, бұл кез келген басқа елдерге қарағанда әлдеқайда көп мақалалармен ерекшеленеді.



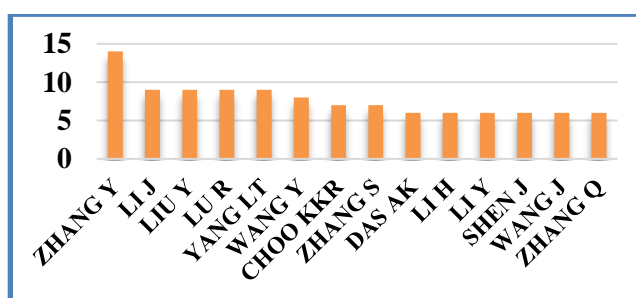
7 сурет – Елдер бойынша бірлескен авторлар желісі

Тақырыптық сөз бейнесі – бұл деректердегі сөздердің жиілігі мен маңыздылығын бірден түсінуге мүмкіндік беретін визуалды ұсыну түрі – бұл жағдайда мақалалардағы кілт сөздер. Мақалалардағы терминдердің (кілт сөздердің) санына пропорционалды қаріп өлшемі өзгеріп отырады, бұл олардың ең маңыздысын жеңіл қабылдауға мүмкіндік береді.

Бұл опцияның мақсаты мүмкіндігінше кең ауқымды сөздерді қамту және әрбір бірлескен сілтемеге бірдей салмақ беретін толық санау әдісін пайдалану болды. Ең жиі қолданылатын келесі кілт сөздерді бөліп көрсетуге болады: «үлкен деректер», «криптография», «деректердің құпиялылығы», «сандық сақтау», «желілік қауіпсіздік», «интернет заттары», «кіруді басқару», «құпиялылық» және «аутентификация».

«Кілт сөздерді сәйкестендіру желісі (KCN) әдебиеттегі кілт сөздер арасындағы байланыстарды зерттеу арқылы ғылыми/техникалық саладағы білім компоненттері мен білім құрылымын түсінуге бағытталған» [4].

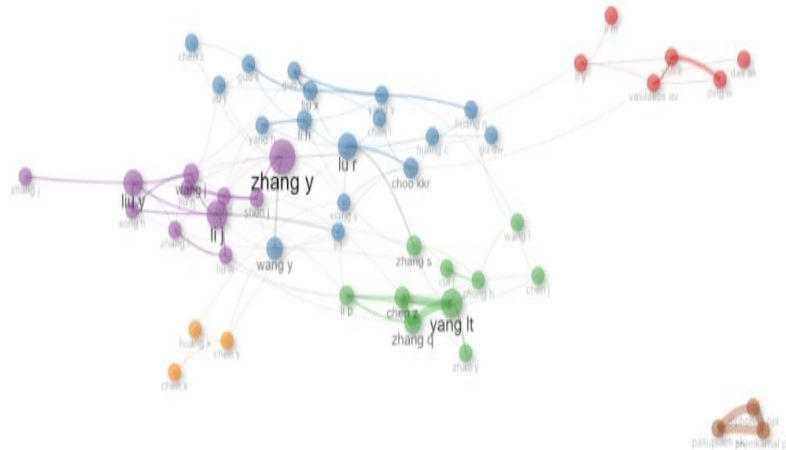
Зерттеу барысында дерекқорда кемінде бес құжаты және өз мақалаларының кемінде үш дәйексөзі бар авторлар ғана ескерілді. Бұл шектеу 17 топқа топтастырылған 35 элементі (авторлары) бар желіні құрды, бұл осы саладағы зерттеулерге қатысты дисперсияның белгілі бір дәрежесін көрсетеді (8-сурет).



8 сурет – Бірлескен авторлық желі

Бірлескен авторлықты білдіретін элементтері көп топтар-1 (қызыл) және 2 (жасыл) кластерлер. 1-кластердің барлық авторларында мақалалар саны бірдей және сілтемелер саны бірдей.

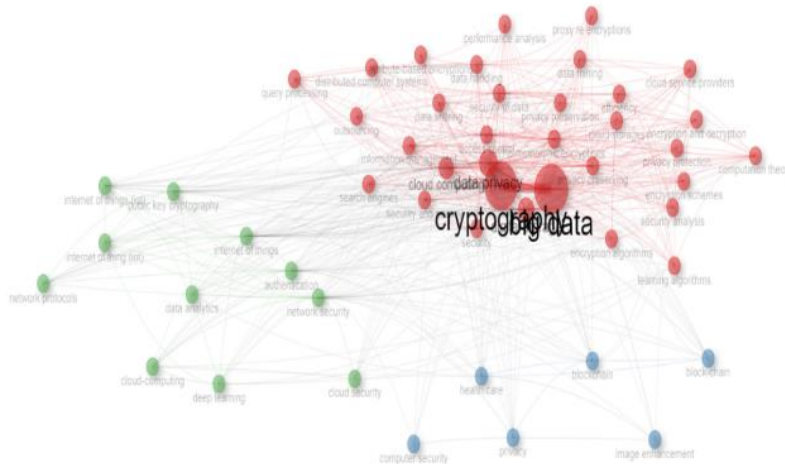
2-кластерде Zhang Y. үлгідегі ең көп мақалалары бар автор [5] және бірлескен авторлыққа ең көп сілтемелері бар авторлар. Сол кластерде көптеген құжаттары бар басқа авторларды табуға болады, мысалы Li J., Liu Y., Lu R., және Yang L. [5,6] Т. Қалған кластерлер келесідей жіктеледі: үш элементі бар бір кластер, екі элементі бар үш кластер және он екі кластерде тек бір элемент бар (9-сурет).



9 сурет – Авторлардың бірлескен авторлық кластері

10-сурет біздің зерттеуіміздің KCN-ін ұсынады. Мақалаларды талдау үш кластерге әкелді, атап айтқанда: 1-кластерде (қызыл) 34 термин, 2-кластерде (жасыл) 11 термин және 3-кластерде (көк) 6 термин бар [7]. Бұл кластерді бұрын жасалған мақалаларды талдаумен салыстырған кезде, қолданылатын терминдердегі сәйкестікті көруге болады.

1-кластер: үлкен деректерді талдау: деректер оларға өз аудиториясын білуге және осылайша олардың үміттеріне сәйкес ұсыныстар беруге мүмкіндік береді. Деректер көлемі орасан зор және кез келген субъектінің оңай қолы жететін ортада тұтынушылар өздерінің жеке деректерін рұқсат етілмеген мақсаттарда заңсыз пайдалану туралы көбірек алаңдайды.



10 сурет – Кілт сөздерді сәйкестендіру желісі

Үлкен деректерді талдау тәртібін анықтайтын негізгі элемент ұйымдарға ақпараттың сипаты мен мақсатына тұтынушылардың қауіпсіздігі мен сенімділігін қамтамасыз етуге ықпал ететін деректерді қорғаудың ашық тәжірибелері мен саясаттарын енгізу қажет [8]. Негізгі есеп беру, ашықтық және ашықтық цифрлық ресурстардың қауіпсіздік стратегиясын басқару, олардың өзара әрекеттесуі және шешім қабылдау үшін үлкен маңызға ие.

2-кластер: Үлкен деректердің сандық активтер қауіпсіздігін басқару стратегияларына әсері Активтердің қауіпсіздігін басқарудың сандық бизнес стратегиялары бизнестің бәсекеге қабілеттілігі мен өзектілігін сақтау үшін жаңа ресурстарды қарастыруды қажет етеді.

Заманауи сценарийде деректерді өндіру және талдау басқару процесінің тиімділігі мен нәтижесін арттыруға ықпал етеді. Кәсіпорындар нақты уақыт режимінде талдауға болатын және болашақ стратегияларды байытатын деректердің керемет көлеміне қол жеткізе алады.

Сандық активтердің қауіпсіздігін басқару стратегияларына арналған талдау құралдары өнімділік пен қаржылық кірістің жақсаруына әкелетін неғұрлым негізделген және сенімді шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді.

3-кластер: Технологиялық өзгерістерге ілесу үшін компаниялар енгізуі керек жүйелердің түрлері [9]. Нақты уақытта деректерді талдау мүмкіндігі кез келген компания үшін тағы бір артықшылық болып табылады. Бұл, әсіресе, жоғары жылдамдықты нарықтарда жұмыс істейтін компанияларға қатысты, мұнда олар сандық активтерді кепілді басқару стратегияларын жүзеге асыру үшін қиындықтар мен мүмкіндіктерді тезірек анықтау керек. Бұл оларға тұтынушылардың талаптарын қанағаттандыратын тиімдірек және креативті ұсыныстарын жасауға мүмкіндік береді [10].

Компаниялар автоматтандырылған жасанды интеллект агенттерімен жабдықталған үлкен деректер қоймаларын енгізеді, олар машиналық оқыту әдістеріне және Индустрия 4.0 технологияларына, әсіресе үлкен деректерге және онымен байланысты технологияларға сүйенеді [11].

Қорытынды.

Сандық активтерді басқарудағы Big Data немесе Үлкен Деректер рөлі соңғы бірнеше жылда артты. Сондықтан цифрлық қоғамда Big Data ақпараттық технологияларын енгізу тақырыбы бойынша осы зерттеудің негізгі үлесі қазіргі уақытта осы білім саласында не жарияланғаны туралы көрнекі түсінік болып табылады. Біз осы тақырып бойынша ең маңызды және өзекті жарияланымдарды анықтадық, ең үлкен ғылыми қызығушылық тудырған тақырыптарды әзірледік және цифрлық контексте технологияны пайдалану туралы толық ақпарат ұсындық. Зерттеу сұрақтарына жауап беру үшін RStudio бағдарламалық құралының көмегімен жүйелі әдебиеттерге шолу және библиометриялық талдау әдістемесі таңдалды.

Үнемі өзгеріп отыратын АТ тенденцияларына байланысты жаңа оқиғаларды болмай тұрып болжау ұйымның заманауи цифрлық активтерді басқарудағы табысының маңызды бөлігі болып табылады. Егер цифрлық активтерді қорғау жөніндегі стратегтер шешім қабылдаудың негізгі мотивтерін түсінсе, олар белгілі бір сенімділік дәрежесімен қарсыластардың болашақ іс-әрекетін болжай алады.

Мысалы, тұтынушылардың мінез-құлқы мен әдеттерін болжау арқылы кәсіпорынның цифрлық активтерінің қауіпсіздік менеджерлері бұзушы тұтынушыларды анықтап, сегменттей алады. Шынында да, мақсатты аудиторияны және әрбір сегментке ең үлкен әсер ететін хабарларды түсіну барлық салаларда бизнес-процестерді дәлірек ете алады. Цифрлық даму моделі экономика мен өнеркәсіпті толық цифрландыруды көздейді. Бұл өнімдердің, жабдықтың және өндірістің «ақылды моделін» немесе «ақылды цифрлық егізін» пайдалану. Таяу болашақта ғылымды дамыту, жоғары білікті кадрлар даярлау, озық өндіріс технологияларын енгізу және әлемдік деңгейдегі бірегей құзыреттерді дамыту да басты басымдықтар болмақ. Дегенмен, ақпараттың қол жетімділігі оның қауіпсіздігіне кепілдік бермейді және компанияның бизнес мәселелерінің нақты шешімін қамтамасыз етпейді. Деректерді талдау шешімдері жай ғана құрал емес, нарық пен компанияның өзі жасаған құнды ақпарат негізінде ақпарат алу және шешім қабылдау құралы болып табылады.

Бизнестің бәсекеге қабілеттілігі артқан сайын, ұйымның стратегиясы бизнестің бәсекеге қабілеттілігі мен өзектілігін сақтаудың жаңа ресурстары мен жолдарын көбірек есепке алуы керек. Бұл нақты және сенімді ақпаратқа, сондай-ақ басқарушылық интуицияға негізделген шешім қабылдауды талап етеді. Ал бұл бизнес мәселелерін шешуге мүлдем басқа көзқарас болып табылады. Үлкен деректердің аналитикалық мүмкіндіктері мақсатты

аудиторияның мінез-құлқы туралы маңызды түсініктер бере алады және үлкен деректер ресурстарының цифрлық қауіпсіздігін басқару стратегиясының арқасында компанияны нарықта неғұрлым өткір және тиімді орналастыруға көмектеседі.

Әдебиеттер тізімі

1. Четвертая промышленная революция. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php>
2. Проблемы безопасности больших данных. (2017). URL: <https://www.osp.ru/os/2017/04/13053380>
3. Туароб, С., Бхатиа, С., Митра, П., & Джайлз, К. Л. (2016) «AlgorithmSeer: система для извлечения и поиска алгоритмов в научных больших данных», IEEE Trans. Большие данные, том. 2, нет. 1, стр. 3–17.
4. Ся, Ф., Ван, В., Бекеле, Т. М. & Лю, Х. (2017). «Большие научные данные: обзор», IEEE Trans. Большие данные, том. 3, нет. 1, стр. 18–35.
5. Li, J., Zhang, Y., Chen, X. & Xiang, Y. (2018). «Безопасный обмен данными на основе атрибутов для пользователей с ограниченными ресурсами в облачных вычислениях», Comput. Безопасность, том. 72, стр. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.08.007>
6. Ли, П., Ли, Дж., Хуанг, З., Гао, К.З., Чен, В.Б. & Чен, К. (2017). «Аутсорсинговая классификация с сохранением конфиденциальности в облачных вычислениях», Cluster Comput., стр. 1-10.
7. Сухак, М., Гани, А., Хан, М.К. & Буйя, Р. (2017). «Динамический удаленный аудит данных для обеспечения безопасности хранения больших данных в облачных вычислениях», Inf. науч., том. 380, стр. 101-116.
8. Chen, X., Li, J., Huang, X., Ma, J. & Lou, W. (2015). «Новые публично проверяемые базы данных с эффективными обновлениями», IEEE Trans. Зависеть. Безопасный компьютер., том. 12, нет. 5, стр. 546-556.
9. Оренчик, К., Сельчук, А., Саваш, Э. & Кантарчиоглу, М. (2016). «Поиск по нескольким ключевым словам в зашифрованных данных с оценкой и запутыванием шаблона поиска», Int. Дж. Инф. Безопасность, том. 15, нет. 3, стр. 251-269.
10. Шен, Дж., Чжоу, Т., Чен, Х., Ли, Дж. & Сусило, В. (2018). «Обмен анонимными и отслеживаемыми групповыми данными в облачных вычислениях», IEEE Trans. Судебно-медицинская экспертиза, том. 13, нет. 4, стр. 912-925.
11. Цзян, Т., Чен, Х., & Ма, Дж. (2016). «Аудит общедоступной целостности для общих динамических облачных данных с отзывом группы пользователей», IEEE Trans. вычисл., том. 65, нет. 8, стр. 2363-2373.

References

1. Chxetvertaya promyshlennaya revolyuciya. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php>
2. Problemy bezopasnosti bol'shih dannyh (2017). URL: <https://www.osp.ru/os/2017/04/13053380>
3. Tuarob, S., Bhatia, S., Mitra, P. & Dzhajlz, K. L. (2016). «AlgorithmSeer: sistema dlya izvlecheniya i poiska algoritmov v nauchnyh bol'shih dannyh», IEEE Trans. Bol'shie dannye, tom. 2, net. 1, str. 3–17.
4. Sya, F., Van, V., Bekele, T. M. & Lyu, H. (2017). «Bol'shie nauchnye dannye: obzor», IEEE Trans. Bol'shie dannye, tom. 3, net. 1, str. 18–35.
5. Li, J., Zhang, Y., Chen, X. & Xiang, Y. «Secure attribute-based data sharing for resource-limited users in cloud computing», Comput. Bezopasnost', tom. 72, str. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.08.007>.
6. Li, P., Li, Dzh., Huang, Z., Gao, K.Z., Chen, V.B. & CHen, K. (2017). «Autsorsingovaya klassifikaciya s sohraneniem konfidencial'nosti v oblachnyh vychisleniyah», Cluster Comput., str. 1-10.

7. Suhak, M., Gani, A., Han, M.K. & Bujya, R. (2017). «Dinamicheskij udalennyj audit dannyh dlya obespecheniya bezopasnosti hraneniya bol'shikh dannyh v oblachnyh vychisleniyah», Inf. nauch., tom. 380, str. 101-116.

8. Chen, X., Li, J., Huang, X., Ma, J. & Lou, W. (2015). «Novye publichno proveryaemye bazy dannyh s effektivnymi obnovleniyami», IEEE Trans. Zaviset'. Bezopasnyj komp'yuter., tom. 12, net. 5, str. 546-556.

9. Orenchik, K., Sel'chuk, A., Savash, E. & Kantarchioglu, M. (2016). «Poisk po neskolk'im klyuchevym slovam v zashifrovannyh dannyh s ocenкой i zaputyvaniem shablona poiska», Int. Dzh. Inf. Bezopasnost', tom. 15, net. 3, str. 251-269.

10. SHen, Dzh., CHzhou, T., CHen, X., Li, Dzh. & Susilo, V. (2018). «Obmen anonimnymi i otslezhivaemymi gruppovymi dannymi v oblachnyh vychisleniyah», IEEE Trans. Inf. Sudebno-medicinskaya ekspertiza., tom. 13, net. 4, str. 912-925.

11. Czyan, T., Chen, X. & Ma, Dzh. (2016). «Audit obshchedostupnoj celostnosti dlya obshchih dinamicheskikh oblachnyh dannyh s otzyvom grupy pol'zovatelej», IEEE Trans. vychisl., tom. 65, net. 8, str. 2363-2373.

ТЕХНОЛОГИИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ: ОБЗОР

Аннотация. Тенденции в сфере ИТ постоянно меняются, и прогнозирование новых событий является ключевым фактором успешного управления цифровыми ресурсами организации, включая большие данные. Цель данного исследования — изучение и анализ больших данных для обеспечения безопасности в режиме реального времени.

В результате библиометрического анализа было получено 323 научные статьи из 137 источников информации, содержащих ключевые слова, связанные с исследованием. В исследование вошли журнальные статьи, главы книг и патенты. Научные работы были отобраны в базах данных Scopus и WoS по основным и вторичным ключевым словам. В исследовании применялись следующие методы: (а) систематический обзор литературы на основе публикаций за период 2013–2023 гг.; (б) библиометрический анализ статей, опубликованных в 2000–2023 гг., с использованием программ RStudio и Bibliometrix.

На основе проведенного анализа авторы приходят к выводу, что в ближайшие десятилетия деловая среда цифрового общества будет определяться стратегией обработки больших данных, направленной на обеспечение кибербезопасности, основанной на глубоком понимании человеческого поведения и искусственного интеллекта. Данный анализ может быть использован техническими специалистами для обоснования новых технологических решений по внедрению ИТ и больших данных в цифровом обществе, а также для подтверждения обоснованности предложений по повышению кибербезопасности при массовой обработке больших данных в прикладных целях.

Ключевые слова: большие данные, цифровые ресурсы, базы данных, библиометрический анализ, информационные технологии, интеллектуальный анализ данных.

BIG DATA TECHNOLOGIES: AN OVERVIEW

Abstract. Trends in the IT sector are constantly evolving, and the ability to anticipate new developments is a key factor in an organization's success in managing digital resources, including big data. The aim of this study is to explore and analyze big data in order to ensure security in real time.

As a result of the bibliometric analysis, 323 scientific articles were obtained from 137 information sources containing the keywords relevant to the study. The research included journal articles, book chapters, and patents. Scientific publications were retrieved from the Scopus and WoS databases using primary and secondary keywords. The study employed the following methods: (a) a systematic literature review based on publications from 2013 to 2023, and (b) a bibliometric analysis of articles published from 2000 to 2023 using the RStudio and Bibliometrix

software.

Based on the analysis, the authors conclude that in the coming decades, the business landscape of the digital society will be shaped by a strategy focused on processing big data to ensure cybersecurity, grounded in a deep understanding of human behavior and artificial intelligence. This analysis can be used by technical professionals to justify new technological solutions for implementing IT and big data in a digital society, as well as to substantiate recommendations for improving cybersecurity during large-scale processing of big data for applied purposes.

Keywords: big data, digital resources, databases, bibliometric analysis, information technology, data mining.

Авторлар туралы мәліметтер

Кубигенова Акку Тулегеновна	Техника ғылымдарының магистрі, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің докторанты, Астана қ., Қазақстан E-mail: akku_kubigenova@mail.ru *
Актаева Алимбуби Умирбековна	PhD, А.Мырзахметов атындағы Көкшетау университетінің «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, доцент, Көкшетау қ., Қазақстан, E-mail: aaktaewa@list.ru
Шәріпбай Алтынбек Әмірұлы	Техника ғылымдарының докторы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразиялық ұлттық университетінің «Жасанды интеллект технологиясы» кафедрасының профессоры, Астана қ., Қазақстан, E-mail: sharalt@mail.ru
Сухомлин Владимир Александрович	Техника ғылымдарының докторы, М.В.Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университетінің «Есептеу математикасы және кибернетика» факультетінің «Ашық ақпараттық технологиялар» зертханасының меңгерушісі, профессор, Мәскеу қ., Ресей Федерациясы E-mail: sukhomlin@mail.ru
Молдашева Раушан Нуркожаевна	PhD, Х. Досмұхамедов атындағы Атырау университеті, «Бағдарламалық инженерия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Атырау қ., Қазақстан, E-mail: raushan85_07@mail.ru

Сведение об авторах

Кубигенова Акку Тулегеновна	Магистр технических наук, докторант Казахского агротехнического исследовательского университета имени С.Сейфуллина, г. Астана, Казахстан E-mail: akku_kubigenova@mail.ru
Актаева Алимбуби Умирбековна	PhD, Ассоциированный профессор кафедры «Информационные системы» Кокшетауского университета им. А.Мырзахметова, г. Кокшетау, Казахстан E-mail: aaktaewa@list.ru
Шәріпбай Алтынбек Әмірұлы	Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология искусственного интеллекта» Евразийского Национального Университета им. Л.Н. Гумилева. E-mail: sharalt@mail.ru
Сухомлин Владимир Александрович	Доктор технических наук, зав. лабораторией «Открытые информационные технологии» факультета ВМК МГУ им.М.В.Ломоносова, профессор, г.Москва, Российская Федерация, E-mail: sukhomlin@mail.ru
Молдашева Раушан Нуркожаевна	PhD, Ассоциированный профессор кафедры "Программная инженерия" Атырауского государственного университета им. Х. Досмұхамедова, г. Атырау, Казахстан E-mail: raushan85_07@mail.ru

Information about authors

Kubigenova Akku	Master of Technical Sciences, Doctoral student of Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, Kazakhstan, E-mail: akku_kubigenova@mail.ru
Aktaeva Alimbubi	PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems, Kokshetau University named after A. Myrzakhmetov, Kokshetau, Kazakhstan, E-mail: aaktaewa@list.ru
Sharipbay Altynbek	Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Artificial Intelligence Technology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: sharalt@mail.ru
Sukhomlin Vladimir	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Open Information Technologies, Faculty of Mechanical Engineering, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, E-mail: sukhomlin@mail.ru
Moldasheva Raushan	PhD, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Kh. Dosmukhamedov Atyrau University, Atyrau, Kazakhstan, E-mail: raushan85_07@mail.ru



УДК 004.89

МРНТИ 28.17.33

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_10

Р.М. Садвакасов^{1*}, К.Ж. Садвакасова¹

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева,
Астана, Казахстан

*E-mail: sadvakasov_ramazan@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ VR-ТЕХНОЛОГИЙ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ, МИКРОСКОПИЧЕСКИХ И ГИБРИДНЫХ ПОДХОДОВ

Аннотация. В статье рассматривается моделирование эвакуации людей из зданий при пожаре с использованием макроскопической, микроскопической и гибридной моделей. Цель работы — разработка подходов для минимизации времени эвакуации и повышения безопасности людей через анализ динамики движения толпы. Исследуются глобальные характеристики потока (макроскопическая модель), индивидуальное поведение агентов (микроскопическая модель) и комбинированный подход (гибридная модель). Используются технологии, такие как Unreal Engine (UE), для создания интерактивных симуляций. Научная значимость работы — сравнительный анализ моделей для прогнозирования времени эвакуации. Практическая ценность заключается в оптимизации архитектурных решений, разработке эвакуационных планов и создании VR-симуляций для обучения. Результаты показывают, что макроскопическая модель даёт быструю оценку, микроскопическая учитывает поведение людей, а гибридная модель наиболее точно отражает динамику эвакуации.

Ключевые слова: Эвакуация людей, пожар, макроскопическая модель, микроскопическая модель, гибридная модель, имитационное моделирование, виртуальная реальность, критическая ситуация.

Введение.

Актуальность исследования обусловлена ростом числа критических ситуаций, таких как пожары, природные катастрофы и техногенные аварии, которые представляют серьёзную угрозу для жизни и здоровья людей, а также для инфраструктуры. В условиях чрезвычайных происшествий ключевым фактором успешного исхода является быстрое принятие решений на основе точного прогнозирования поведения людей и динамики их эвакуации. Современные технологии моделирования, включая виртуальную реальность (VR), предоставляют новые возможности для анализа и отработки действий в экстремальных условиях.

Технологии виртуальной реальности становятся эффективным инструментом для изучения поведения людей и оптимизации эвакуационных маршрутов. Современные исследования подтверждают, что VR-методы позволяют исследовать выбор выходов при эвакуации, оценивать влияние различных факторов (например, знаков выхода и поведения окружающих) и моделировать массовые эвакуации в условиях пожара [1–3]. Данные VR также применяются для калибровки агентных моделей, что повышает

точность прогнозирования реального поведения людей [4]. Исследования показывают, что виртуальные среды позволяют безопасно моделировать поведение людей в условиях стресса и тревожности, учитывая психофизиологические аспекты [5–8]. Особое внимание уделяется использованию современных технологий, таких как UE, для создания реалистичных симуляций, которые позволяют отрабатывать стратегии действий в виртуальной среде.

Целью данной работы является разработка имитационной 3D-модели поведения агентов, которая позволит анализировать их действия в критических ситуациях и прогнозировать эвакуационные маршруты. Для достижения этой цели были определены следующие задачи:

1. Построение математической модели движения агентов.
2. Реализация алгоритмов эвакуации в виртуальной среде.
3. Интеграция результатов в игровые движки (например, UE) для визуализации и анализа [9].

Полученные результаты могут быть использованы для обучения персонала, тестирования планов эвакуации и совершенствования проектирования зданий с точки зрения безопасности.

Объектом исследования являются методы моделирования поведения человека в критических ситуациях, с акцентом на пожары. Предметом исследования выступают математические модели — макроскопическая, микроскопическая и гибридная, — применяемые для описания динамики движения толпы и процессов эвакуации.

Гипотеза исследования заключается в том, что комбинированный (гибридный) подход, объединяющий преимущества макроскопической и микроскопической моделей, позволяет достичь наиболее точного прогнозирования времени эвакуации и учитывать как глобальные характеристики потока, так и индивидуальное поведение агентов.

Теоретическая значимость исследования состоит в проведении сравнительного анализа существующих методов моделирования поведения людей в критических ситуациях, выявлении их ограничений и преимуществ, а также в разработке рекомендаций по применению гибридных моделей для повышения точности прогнозов. Практическая ценность работы определяется в возможности использования полученных данных для:

- оптимизации архитектурных решений (например, проектирования эвакуационных путей и выходов);
- разработки эффективных планов эвакуации;
- создания интерактивных VR-симуляций для обучения специалистов.

Таким образом, данное исследование направлено на решение актуальной задачи повышения безопасности людей в критических ситуациях за счёт развития теоретических и практических подходов к моделированию их поведения.

Материалы и методы исследования.

В рамках исследования были изучены различные подходы и средства для моделирования поведения человека, а именно: клеточные автоматы, непрерывные методы (на основе аналогии с динамикой жидкости), броуновское движение, ньютоновскую механику, мультиагентные и графоаналитические методы, а также их комбинации в рамках гибридных моделей (см. таблица 1) [10].

Таблица 1 - Методы моделирования поведения человека

п/п	Методы	Содержание	Плюсы	Минусы
1	Клеточных автоматов	Метод клеточных автоматов впервые рассмотрел фон Нейман. Это дискретная	Несложное описание	Поведение людей ограничено во

		модель, где время и пространство дискретны, а состояние клетки зависит от её соседей	правил и прост в реализации.	времени и пространстве
2	Непрерывные методы (физических процессов динамики жидкости)	Расстояние между людьми меньше окружающего пространства. В уравнении движения человека учитываются три гипотезы: 1. Скорость агента зависит от плотности окружающих, их поведения и внешней среды. 2. Агенты имеют цель. 3. Агенты минимизируют время в пути, учитывая первые две гипотезы. Численное решение показало аналогию с динамикой жидкости: каждый элемент толпы — частица жидкости	Можно рассматривать как динамическую систему	Гипотеза 1 не подходит при высокой плотности людей. Результат гипотезы 2 зависит от информированности агентов, а гипотезы 3 — от причины движения и мотивации
3	Броуновское движение	Модель движения агента, основана на уравнении Фоккера - Планка		Применима не для всех ситуации
4	Ньютоновская механика	Движение агента описывается на основе второго закона Ньютона		Не применимо к гетерогенной толпе, где агенты имеют различные цели и характеристики
5	Мультиагентные методы	В моделировании создаётся набор правил, которым подчиняется каждый агент, без описания всей динамической системы	Простой способ задания правил поведения для участников	Наличие большого количества параметров, влияющих на поведение людей
6	Графоаналитический метод	Метод основан на изучении поведение толпы в реальных условиях	Модель описывает статистические параметры толпы: среднюю скорость, плотность и время достижения цели	Высокая сложность расчета

7	Гибридные методы	Использует комбинацию нескольких подходов, включая идею скалярных полей	Для создания моделей поведения можно объединить преимущества других моделей в одной теории	Трудно объединить несколько подходов в одной модели из-за разных методик описания взаимодействия в толпе
8	Модель ADPLV	Идея имитационного моделирования заключается в слабой зависимости скорости движения от плотности окружающих	Результаты моделирования совпадают с наблюдениями	Невозможно применить к гетерогенной толпе с различными целями и характеристиками агентов
<i>Примечание - Источник: [10]</i>				

Каждый метод можно отнести к одному из трёх уровней моделирования: макроскопическому, микроскопическому или гибриднему, что помогает систематизировать подходы и выделить их особенности при анализе сложных процессов, таких как эвакуация. Из-за высокой опасности и сложности проведения реальных экспериментов по эвакуации акцент смещается на имитационное моделирование, которое учитывает взаимодействие и поведение людей в критических ситуациях. Применение UE позволяет создавать реалистичные симуляции для обучения в безопасной среде, что улучшает прогнозирование поведения толпы, проектирование эвакуационных планов и обучение персонала.

1. Макроскопическая модель

Макроскопическая модель движения толпы основана на аналогии с уравнениями Навье–Стокса для потоков людей в ограниченных пространствах, таких как коридоры и эвакуационные выходы. Толпа рассматривается как континуальная среда, характеризующая плотностью и скоростью, что позволяет анализировать массовый поток и среднее время эвакуации. Однако модель упрощает динамику, игнорируя такие факторы, как вязкость и давление, а также индивидуальное поведение людей.

Основное уравнение потока:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

где:

ρ — плотность толпы, выраженная в людях на квадратный метр

v — вектор скорости движения толпы

Для анализа эвакуации использовались следующие исходные данные:

Площадь помещения: $S = 100 \text{ м}^2$

Ширина эвакуационного выхода: $W = 2 \text{ м}$,

Плотность людей: $\rho = 2 \text{ чел/м}^2$

При плотности $\rho = 2 \text{ чел/м}^2$ и скорости движения агентов: от $v_{\min} = 1 \text{ м/с}$ до $v_{\max} = 1.5 \text{ м/с}$, $v_{\text{ср}} = 1.25 \text{ м/с}$ через выход шириной $W = 2 \text{ м}$ можно рассчитать массовый поток людей.

Массовый поток Q через эвакуационный выход рассчитывается по формуле:

$$Q = \rho \cdot W \cdot v_{\text{cp}} \quad (2)$$

Время, необходимое для эвакуации $n=50$ человек, вычисляется по формуле:

$$t_{\text{эвак}} = \frac{n}{\rho \cdot W \cdot v_{\text{cp}}} \quad (3)$$

Сначала рассчитаем массовый поток:

$$Q = \rho \cdot W \cdot v_{\text{cp}} = 2 \text{ чел/м}^2 \cdot 2\text{м} \cdot 1.25 \text{ м/с} = 5 \text{ чел/с} \quad (4)$$

Теперь подставим в формулу для времени эвакуации:

$$t_{\text{эвак}} = \frac{n}{Q} \quad (5)$$

$$t_{\text{эвак}} = \frac{50}{5} \approx 10 \text{ с}$$

Время эвакуации 50 человек составляет 10 секунд. Модель анализирует параметры массовой эвакуации, такие как скорость через узкие проходы, влияние препятствий на плотность потока и формирование «узких мест». Однако она основана на упрощенной макроскопической аналогии и не учитывает индивидуальные поведенческие реакции людей, такие как паника, изменение направления и взаимодействия между людьми. Эти ограничения снижают точность модели в условиях высокой плотности и сложных ситуаций (например, задымление или ограниченная видимость).

2. Микроскопическая модель

Микроскопическая модель описывает поведение агентов, учитывая скорость движения, реакцию на окружающих и препятствия. Каждый агент моделируется системой уравнений, определяющих его движение по координатам x и y .

Основные уравнения движения агента:

$$\frac{dx_i}{dt} = v_i \cdot \cos(\theta_i) \quad (6)$$

$$\frac{dy_i}{dt} = v_i \cdot \sin(\theta_i)$$

где:

v_i — скорость движения агента,

θ_i — угол направления движения,

x_i y_i — координаты агента.

Для моделирования поведения агентов в критической ситуации были приняты следующие параметры:

Количество агентов $n=50$,

Скорость движения агентов $v_i = 1.5$ м/с для одних и $v_i = 1.0$ м/с для других.

Рассмотрим помещение площадью 100 м^2 с 50 агентами. При этом скорость движения агентов $v_i = 1.5$ м/с для одних и $v_i = 1.0$ м/с для других.

Для расчета времени эвакуации с использованием микроскопической модели, можно использовать среднюю скорость движения агентов. В данном случае у нас есть два типа агентов с различной скоростью:

Рассчитаем среднюю скорость v_i :

$$v_{\text{cp}} = \frac{n_1 v_1 + n_2 v_2}{n_1 + n_2} \quad (7)$$

где: $n_1 = n_2 = 25$ – количество агентов каждой группы.

Подставим значения:

$$v_{\text{ср}} = \frac{25 \cdot 1.5 + 25 \cdot 1.0}{25 + 25} = 1.25 \text{ м/с}$$

Теперь учтем взаимодействия агентов: из-за плотности и столкновений средняя скорость снижается на 10%. Новая средняя скорость $v_{\text{ср, взаимодействия}}$ вычисляется как:

$$v_{\text{ср, взаимодействия}} = 1.25 \cdot 0.9 = 1.125 \text{ м/с.} \quad (8)$$

Теперь рассчитаем время эвакуации, предполагая, что агенты выходят через один выход. Для этого нам нужно определить расстояние до выхода.

Если предположить, что выход находится на расстоянии $d = 12.5$ метров от центра помещения, то время эвакуации $t_{\text{эвак}}$ можно вычислить как:

$$t_{\text{эвак}} = \frac{d}{v_{\text{ср, взаимодействия}}} \quad (9)$$

Чтобы продолжить, необходимо определить расстояние d . Если, например, $d = 12.5$ м, тогда подставляем значения:

$$t_{\text{эвак}} = \frac{12.5}{1.125 \text{ м/с}} = 11.11 \text{ с}$$

Если известное расстояние до выхода другое, просто замените значение d в формуле.

В результате моделирования видно, что более быстрые агенты оказывают влияние на поведение медленных, что может вызвать замедление общего процесса эвакуации. Это демонстрирует важность учета взаимодействий между агентами при моделировании эвакуации.

3. Гибридная модель

Гибридная модель сочетает макроскопическое моделирование потоков людей с микроскопическим моделированием агентов. Она учитывает параметры потока, такие как плотность, и индивидуальные характеристики агентов, например, скорость и направление, что позволяет точнее предсказывать поведение людей в ограниченных пространствах с препятствиями. Моделировалось прямоугольное помещение площадью 100 м² с эвакуационным выходом шириной 2 м. Использовались следующие параметры:

Количество агентов: $n = 50$,

Скорость движения агентов: от $v_{\text{min}} = 1$ м/с до $v_{\text{max}} = 1.5$ м/с,

Плотность людей в начальный момент времени: 2 чел/ м²

Для простоты предположим, что половина агентов движется со скоростью 1 м/с, а другая половина — со скоростью 1.5 м/с:

Расчет средней скорости агентов:

$$v_{\text{ср}} = \frac{n_1 v_1 + n_2 v_2}{n_1 + n_2} \quad (10)$$

где $n_1 = n_2 = 25$ (по 25 агентов с каждой скоростью)

$$v_{\text{ср}} = 1.25 \text{ м/с}$$

Теперь учтем взаимодействие между агентами. Из-за плотности и столкновения средняя скорость снижается на 20%. Новая средняя скорость $v_{\text{ср, взаимодействия}}$ будет:

$$v_{\text{ср, взаимодействия}} = 1.25 \cdot 0.8 = 1.0 \text{ м/с} \quad (11)$$

Определение плотность потока по формуле:

$$Q = \rho \cdot v_{\text{ср, взаимодействия}} \cdot W \quad (12)$$

Подставим значения:

$$Q = 2 \text{ чел/м}^2 \cdot 1.0 \text{ м/с} \cdot 2\text{м} = 4 \text{ чел/с}$$

Время, необходимое для эвакуации всех агентов, можно рассчитать по формуле:

$$t_{\text{эвак}} = \frac{n}{Q} \quad (13)$$

Подставляем значения:

$$t_{\text{эвак}} = \frac{50}{4} = 12.5 \text{ с}$$

Таким образом, время эвакуации для 50 агентов составляет примерно 12.5 секунд, учитывая условия модели.

Имитационное моделирование в виртуальной среде

Первым шагом разработки симуляции критической ситуации является выбор сценария для обучения. В нашем случае это пожар на площади $S=100 \text{ м}^2$. В VR-окружении моделируются различные сценарии, включая распространение огня, задымление и изменения условий эвакуации. UE интегрирует 3D-среду и VR, программируя агентов с помощью Blueprints и C++. Blueprints упрощает разработку и быстрые изменения сценария. UE предоставляет возможность создавать детализированные и интерактивные симуляции критических ситуаций, в которых агенты взаимодействуют с виртуальной средой и друг с другом. Алгоритмы, основанные на математических формулах, лежат в основе создания сцены с агентами и препятствиями. Каждый шаг реализации требует использования инструментов UE, таких как Blueprints или C++.

Рисунки 1 и 2 показывают фрагменты Blueprint-кода, реализующего падение агента при контакте с огнём: Рисунок 1 — скрипт, отвечающий за падение, Рисунок 2 — симуляция процесса.

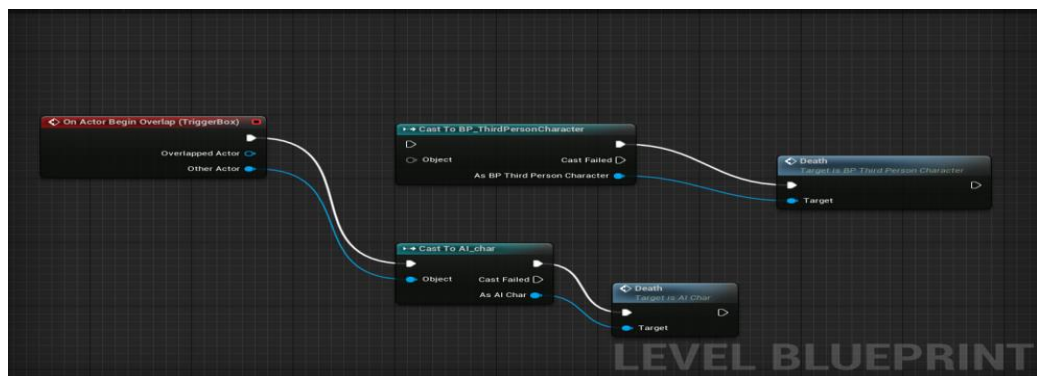


Рисунок 1 – Фрагмент Blueprint скрипта – передачи данных AI агенту

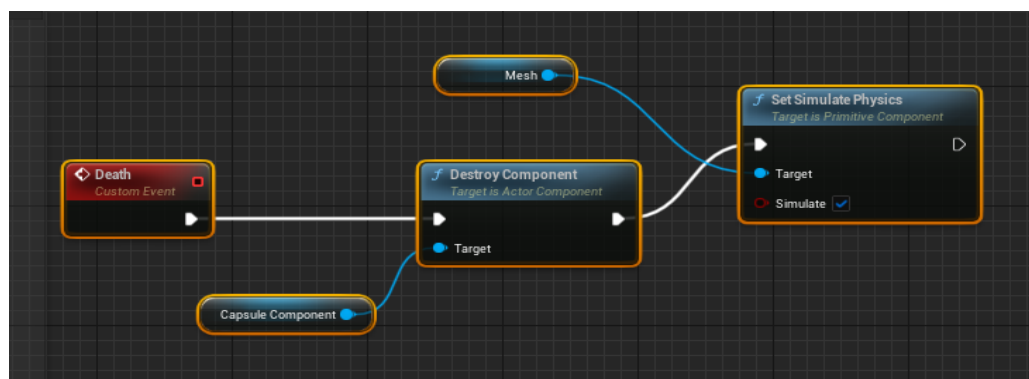


Рисунок 2 – Фрагмент Blueprint скрипта, симуляции падения при столкновении с огнём

На рисунке 3 и 4 представлены симуляция взаимодействия агентов (людей) в помещении при пожаре в VR-среде. Продемонстрированы примеры работы AI-агентов в UE, использующих Nav Mesh, Target Point, систему EQS и Crowd Controller AI для определения оптимального маршрута эвакуации.

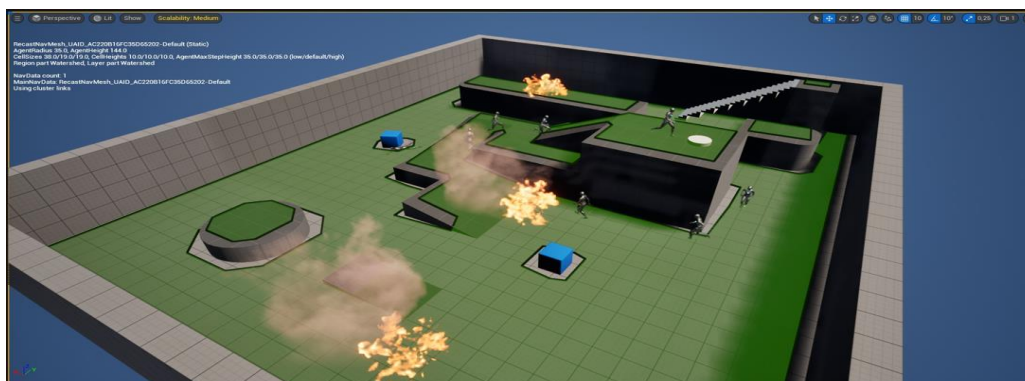


Рисунок 3 – Симуляция эвакуации агентов в VR-среде при пожаре с использованием AI-агентов в UE для поиска оптимального маршрута с Nav Mesh, Target Points, EQS и Crowd Controller AI



Рисунок 4 – Поведение AI-агентов при пожаре: визуализация их реакции на распространение огня в VR-среде и принятие решений для поиска безопасного маршрута

Результаты и их обсуждения.

В ходе исследования были реализованы три математические модели эвакуации — макроскопическая, микроскопическая и гибридная — с использованием игрового движка UE. Программная реализация была выполнена на языке C++ с применением Blueprints для визуализации. Агенты ориентируются в пространстве, минимизируя расстояние до выхода, избегая препятствий и адаптируясь к изменяющимся условиям, таким как задымленность и паника.

Использование VR-технологий позволило смоделировать поведение агентов и проанализировать реакцию пользователей в стрессовых ситуациях, что способствовало уточнению математических моделей. Внедрение алгоритмов избегания препятствий и адаптивных маршрутов повысило точность предсказания движения агентов. Интеграция модели в UE подтвердила эффективность применения VR-моделирования для изучения поведения людей в критических ситуациях.

Сравнение трёх моделей показало следующие различия (см. таблица 2):

Таблица 2 - Сравнительный анализ моделей

Модель	Время эвакуации	Ключевые характеристики
Макроскопическая	10 с	Учитывает глобальные параметры потока (плотность, скорость), не учитывает индивидуальное поведение агентов
Микроскопическая	11.11	Фокусируется на индивидуальном поведении агентов, их взаимодействии, показывает замедления при высокой плотности.
Гибридная	12.5 с	Комбинирует макроскопические и микроскопические параметры, наиболее точна для сложных сценариев

1. Макроскопическая модель, основанная на аналогии с уравнениями Навье–Стокса, показала минимальное время эвакуации (10 с), но игнорирует индивидуальные реакции агентов, что может недооценивать время эвакуации в реальных условиях.

2. Микроскопическая модель продемонстрировала более высокое время эвакуации (11.11 с), что связано с учётом индивидуального поведения агентов, замедляющего движение при высокой плотности.

3. Гибридная модель показала время эвакуации 12.5 с. Хотя это значение больше, чем у макроскопической модели, гибридный подход обеспечивает наиболее точную симуляцию, сочетая глобальные параметры потока с индивидуальным поведением агентов.

Результаты исследования подтверждают гипотезу о том, что гибридная модель наиболее точно моделирует процесс эвакуации, учитывая как взаимодействие агентов, так и возможные задержки из-за переполненности и изменения траекторий. Эти факторы важны для более реалистичного прогнозирования динамики эвакуации.

Макроскопическая модель, несмотря на быстрое время эвакуации, имеет ограниченную применимость в условиях высокой плотности и сложной геометрии пространства. Микроскопическая модель, с другой стороны, требует значительных вычислительных ресурсов, но предоставляет более детализированное описание поведения агентов.

Использование VR-технологий и UE дало возможность не только визуализировать движение агентов, но и смоделировать сценарии эвакуации с учётом таких факторов, как задымлённость, паника и динамические изменения. Это подчеркнуло важность учёта психофизиологических факторов (например, стресса и паники) для повышения точности прогнозирования и разработки эффективных стратегий эвакуации.

Заключение.

В работе рассмотрены три подхода к моделированию эвакуации: макроскопический, микроскопический и гибридный. Макроскопическая модель эффективна для оценки общей динамики потока, но не учитывает индивидуальное поведение. Микроскопическая модель предоставляет более детализированную информацию, но требует значительных вычислительных ресурсов. Гибридная модель сочетает в себе преимущества обеих моделей, обеспечивая баланс между точностью и эффективностью, особенно в сложных сценариях эвакуации.

Использование VR-технологий позволило моделировать эвакуацию с учётом задымлённости, паники и динамических изменений, что подчеркивает важность современных технологий для точного прогнозирования и разработки стратегий эвакуации.

Практическая значимость работы заключается в анализе сценариев эвакуации, выявлении узких мест и предложении рекомендаций по улучшению безопасности.

Перспективы дальнейших исследований включают:

1. Учёт психологических факторов (паника, стресс).
2. Моделирование эвакуации при задымлении.
3. Интеграцию с сенсорными данными для управления в реальном времени.

Исследование подтверждает перспективность использования гибридных моделей и VR-технологий для повышения безопасности в критических ситуациях.

VR ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ӨРТ ЖАҒДАЙЫНДА ЭВАКУАЦИЯЛАУ ПРОЦЕСІН МОДЕЛЬДЕУ: МАКРОСКОПИЯЛЫҚ, МИКРОСКОПИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ГИБРИДТІК ТӘСІЛДЕРДІ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

***Аңдатпа.** Мақалада өрт кезінде ғимараттардан адамдарды эвакуациялау процесін макроскопиялық, микроскопиялық және гибридік модельдерді пайдалану арқылы модельдеу қарастырылады. Жұмыстың мақсаты — эвакуация уақытын азайту және адамдардың қауіпсіздігін арттыру үшін толқын қозғалысының динамикасын талдау арқылы тәсілдер әзірлеу. Зерттеу барысында ағынның глобалды сипаттамалары (макроскопиялық модель), агенттердің жеке мінез-құлқы (микроскопиялық модель) және біріктірілген тәсіл (гибридік модель) қарастырылады. Unreal Engine (UE) сияқты технологиялар интерактивті симуляциялар жасау үшін пайдаланылады. Жұмыстың ғылыми маңызы — эвакуация уақытын болжау үшін модельдердің салыстырмалы талдауы. Қолданбалы құндылығы архитектуралық шешімдерді оңтайландыруда, эвакуациялық жоспарларды әзірлеуде және оқыту үшін VR-симуляцияларын жасауда көрінеді. Нәтижелер макроскопиялық модельдің жылдам бағалауды қамтамасыз ететінін, микроскопиялық модель адамдардың мінез-құлқын ескеретінін, ал гибридік модель эвакуацияның динамикасын ең дәл көрсетуге мүмкіндік беретінін көрсетеді.*

***Түйін сөздер:** Адамдарды эвакуациялау, өрт, макроскопиялық модель, микроскопиялық модель, гибридік модель, имитациялық модельдеу, виртуалды шындық, критикалық жағдай.*

MODELING THE EVACUATION PROCESS IN FIRE CONDITIONS USING VR TECHNOLOGIES: A COMPARATIVE ANALYSIS OF MACROSCOPIC, MICROSCOPIC, AND HYBRID APPROACHES

***Abstract.** This paper examines the modeling of human evacuation from buildings during fire incidents using macroscopic, microscopic, and hybrid simulation models. The primary objective is to develop strategies aimed at minimizing evacuation time and enhancing safety through the analysis of crowd movement dynamics. The study investigates global flow characteristics using a macroscopic model, individual agent behavior with a microscopic model, and a combined approach in a hybrid model. Technologies such as Unreal Engine (UE) are utilized to create interactive simulations. The scientific significance of this work lies in the comparative evaluation of different modeling approaches for predicting evacuation times. The practical value includes optimizing architectural design, developing effective evacuation plans, and creating VR-based training simulations. Results indicate that while the macroscopic model provides rapid estimation and the microscopic model accounts for individual behavioral factors, the hybrid model most accurately reflects real-world evacuation dynamics.*

***Key words:** Evacuation of people, fire, macroscopic model, microscopic model, hybrid model, simulation modeling, virtual reality, critical situation.*

Список литературы

1. Фэн, Ю., Дуйвес, Д. К., & Хогендорн, С. П. (2021). Использование виртуальной реальности для изучения выбора выходов пешеходами при эвакуации. *Safety Science*, 13, 105158. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105158>
2. Го, Ю., Чжу, Дж., Ван, Ю., и др. (2020). Метод моделирования эвакуации толпы в многоуровневой внутренней среде с огнем с использованием виртуальной реальности. *International Journal of Geo-Information*, 9 (12), 750. <https://doi.org/10.3390/ijgi9120750>
3. Марин-Моралес, Х., Ллинарес, К., Гиксерес, Х., & Алканис, М. (2020). Распознавание эмоций в погружающей виртуальной реальности: от статистики к аффективным вычислениям. *Sensors*, 20 (18), 5163. <https://doi.org/10.3390/s20185163>
4. Юржик, В., Ухлик, О., Снопкова, Д., и др. (2023). Анализ использования поведенческих данных из виртуальной реальности для калибровки моделей эвакуации на основе агентов. *Heliyon*, 9 (4), e14275. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14275>
5. де Лама, К., Гонсалес-Гайя, К., & Санчес-Лите, А. (2020). Экспериментальное предложение для изучения поведения человека в условиях пожара с использованием виртуальных сред. *Sensors*, 20 (12), 3607. <https://doi.org/10.3390/s20123607>
6. Ахмед, И., Харьюнен, В. Дж., Якуцци, Г., Равая, Н., Руотсало, Т., & Спапе, М. М. (2023). Прикосновение к виртуальным людям: тактильные реакции показывают эмоциональное воздействие аффективных агентов. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 14 (1), 331–345. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2020.3038137>
7. Мухамад, С. Б. С., & Бахрин, М. Х. (2017). Моделирование виртуальных сред в исследовательском реакторе. *AIP Conference Proceedings*, 1799(1), 050007. <https://doi.org/10.1063/1.4972941>
8. Муньос, Ж. Э., Лавуа, Ж. А., & Поп, А. Т. (2024). Психофизиологические инсайты и пользовательские перспективы: усиление навыков полицейского снижения напряженности через полнотелую виртуальную реальность. *Frontiers in Psychology*, 15, 1390677. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1390677>
9. Брукс, Дж., Варбуртон, М., Альгадьер, М., и др. (2020). Изучение человеческого поведения с помощью виртуальной реальности: методологическая основа Unity. *Behavior Research Methods*, 52 (1), 455–463. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01242-0>
10. Гребенников, Р. В. (2011). Моделирование поведения толпы с использованием локальных скалярных полей [Моделирование поведения толпы с использованием локальных скалярных полей] (Неопубликованная кандидатская диссертация). Воронежский государственный технический университет. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/230757270_Modelirovanie_povedenia_tolpy_s_ispolzovaniem_lokalnyh_skalarnyh_polej

References

1. Feng, Y., Duives, D. C., & Hoogendoorn, S. P. (2021). Using virtual reality to study pedestrian exit choices during evacuation. *Safety Science*, 137, 105158. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105158>
2. Guo, Y., Zhu, J., Wang, Y., et al. (2020). A virtual reality simulation method for crowd evacuation in a multi-exit indoor fire environment. *International Journal of Geo-Information*, 9 (12), 750. <https://doi.org/10.3390/ijgi9120750>
3. Marín-Morales, J., Llinares, C., Guixeres, J., & Alcañiz, M. (2020). Emotion recognition in immersive virtual reality: From statistics to affective computing. *Sensors*, 20 (18), 5163. <https://doi.org/10.3390/s20185163>
4. Juřík, V., Uhlík, O., Snopková, D., et al. (2023). Analysis of the use of behavioral data from virtual reality for calibration of agent-based evacuation models. *Heliyon*, 9 (4), e14275. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14275>

5. de Lama, C., González-Gaya, C., & Sánchez-Lite, A. (2020). An experimental test proposal to study human behaviour in fires using virtual environments. *Sensors*, 20 (12), 3607. <https://doi.org/10.3390/s20123607>
6. Ahmed, I., Harjunen, V. J., Jacucci, G., Ravaja, N., Ruotsalo, T., & Spapé, M. M. (2023). Touching virtual humans: Haptic responses reveal the emotional impact of affective agents. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 14 (1), 331–345. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2020.3038137>
7. Muhamad, S. B. S., & Bahrin, M. H. (2017). Virtual environments simulation in research reactor. *AIP Conference Proceedings*, 1799 (1), 050007. <https://doi.org/10.1063/1.4972941>
8. Muñoz, J. E., Lavoie, J. A., & Pope, A. T. (2024). Psychophysiological insights and user perspectives: Enhancing police de-escalation skills through full-body VR training. *Frontiers in Psychology*, 15, 1390677. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1390677>
9. Brookes, J., Warburton, M., Alghadier, M., et al. (2020). Studying human behavior with virtual reality: The Unity Experiment Framework. *Behavior Research Methods*, 52 (1), 455–463. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01242-0>
10. Grebennikov, R. V. (2011). Modelirovanie povedeniya tolpy s ispolzovaniem lokal'nykh skalyarnykh poley [Modeling crowd behavior using local scalar fields] (Unpublished doctoral dissertation). Voronezh State Technical University. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/230757270_Modelirovanie_povedenia_tolpy_s_ispolzovaniem_lokalnyh_skalarnyh_polej

Авторлар туралы мәлімет

Сәдуақасов Рамазан Маратұлы	Техникалық ғылымдар магистрі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Жасанды интеллект технологиялары» кафедрасының оқытушысы, Астана қаласы, Қазақстан, Email: sadvakasov_ramazan@mail.ru
Сәдуақасова Кұралай Жанжігітқызы	Педагогика ғылымдарының кандидаты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Компьютерлік және бағдарламалық инженерия» кафедрасының м. а. доценті, Астана қ., Қазақстан. E-mail: k.sadvakasova@inbox.ru

Сведение об авторах

Садвақасов Рамазан Маратович	магистр технических наук., преподаватель кафедры «Технологий искусственного интеллекта» Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева, г. Астана, Казахстан, E-mail: sadvakasov_ramazan@mail.ru
Садвақасова Куралай Жанжигитовна	кандидат педагогических наук., и.о. доцент кафедры «Компьютерная и программная инженерия» Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева, г. Астана, Казахстан, E-mail: k.sadvakasova@inbox.ru

Information about the authors

Sadvakassov Ramazan Maratovich	Master of Technical Sciences, Lecturer at the Department of Artificial Intelligence Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, Email: sadvakasov_ramazan@mail.ru
Sadvakassova Kuralay Zhanzhigitovna	Candidate of Pedagogical Sciences, Acting Associate Professor of the "Computer and Software Engineering" Department, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: k.sadvakasova@inbox.ru



УДК 55.30.05

МРНТИ 78.25.43; 78.25.13

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_11

М.С. Ибраим¹, К.М. Мырзабеков², Ж.Ж. Оралбек^{3*}

^{1,2,3}Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева,
Алматы, Казахстан

*E-mail: zha.oralbek@aues.kz

АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА РАЗРАБОТКИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАЗМИНИРОВАНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Аннотация. В статье проведен анализ мирового опыта разработки и внедрения роботизированных комплексов для разминирования, направленных на повышение безопасности и эффективности очистки территорий от мин и самодельных взрывных устройств. Рассмотрены современные технологии, используемые в автономных и дистанционно управляемых системах, включая сенсорные комплексы, навигационные системы, элементы искусственного интеллекта и интеграцию с беспилотными летательными аппаратами.

Методология исследования основана на сравнительном анализе существующих решений, изучении практики их применения в ведущих странах, таких как США, Россия, Китай и государства Европейского Союза, а также на оценке эффективности различных типов роботизированных комплексов, включая наземные платформы, мобильные роботы и беспилотные летательные аппараты.

В рамках практической части работы реализована математическая модель комбинированной сенсорной системы обнаружения, объединяющей индуктивные и ультразвуковые датчики, с целью повышения надёжности классификации объектов при разминировании. Разработка представлена в среде MATLAB Simulink и может служить основой для дальнейших исследований и внедрения интеллектуальных сенсорных модулей в состав отечественных роботизированных комплексов.

Также в статье рассмотрены перспективы локализации и адаптации передовых решений в Казахстане, включая разработку отечественных роботизированных платформ, возможность использования зарубежных технологий с учетом климатических и географических особенностей региона, а также необходимость совершенствования нормативно-правовой базы, развития инфраструктуры и подготовки специалистов для эффективного внедрения данных систем. Подчеркивается значимость дальнейших исследований в области автономных технологий, сенсорных систем и их интеграции в военную и гуманитарную сферы.

Ключевые слова: разминирование, мины, роботизированные комплексы, самодельные взрывные устройства, автономные системы.

Введение.

Мины и самодельные взрывные устройства (СВУ) представляют собой одну из наиболее серьезных угроз в зонах боевых действий и постконфликтных территориях. Эти средства поражения используются как традиционными вооруженными силами, так и

террористическими группировками, создавая серьезные препятствия для ведения военных операций, гуманитарных миссий и восстановления мирной жизни. По данным ООН [1], ежегодно тысячи людей становятся жертвами минных взрывов, включая военных, саперов и гражданских лиц, а разминирование территорий остается сложной и дорогостоящей задачей.

Традиционные методы разминирования включают использование саперных групп, обученных собак, специальных механических устройств и детекторов взрывчатых веществ. Однако эти методы имеют ряд значительных недостатков: высокую степень риска для саперов, ограниченную точность обнаружения мин, значительное время, необходимое для очистки больших территорий, а также сложность работы в неблагоприятных погодных условиях и сложном рельефе. Эти проблемы привели к необходимости разработки и внедрения роботизированных систем разминирования, которые способны выполнять сложные задачи с минимальным участием человека, снижая угрозу для личного состава и увеличивая скорость и эффективность операций [2].

Современные роботизированные комплексы для разминирования представляют собой автономные или дистанционно управляемые платформы, оснащенные различными сенсорами, средствами механического разминирования и программным обеспечением, обеспечивающим анализ данных и управление операциями. Они могут действовать как самостоятельно, так и в составе интегрированных систем, взаимодействующих с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), спутниковыми системами и наземными разведывательными комплексами [3]. Применение таких систем значительно повышает безопасность и снижает затраты на разминирование, особенно в сложных и опасных районах.

В последние десятилетия страны с развитым оборонно-промышленным комплексом активно разрабатывают и внедряют роботизированные системы для разминирования. США, Россия, Китай, страны Евросоюза и другие государства инвестируют значительные ресурсы в развитие подобных технологий [4]. Существуют как тяжелые гусеничные комплексы, предназначенные для механического уничтожения мин, так и мобильные роботы, способные дистанционно управляться саперами. В ряде случаев используются специализированные дроны, оснащенные оптико-электронными и магнитными сенсорами для поиска мин и других опасных объектов [5].

Казахстан, обладая значительными территориями, часть которых исторически подвергалась военным действиям, а также участвуя в международных миротворческих миссиях, нуждается в разработке и применении эффективных роботизированных решений для разминирования. Это требует активного развития отечественных технологий в данной области, что позволит создать передовые инженерные решения, адаптированные под специфические условия региона, повысить эффективность операций разминирования и укрепить научно-технический потенциал страны [6].

В данной статье рассматриваются основные мировые тенденции в разработке и применении роботизированных комплексов для разминирования, анализируются успешные примеры их внедрения в вооруженных силах различных стран и предлагаются возможные пути адаптации передового опыта для нужд вооруженных сил Казахстана. Акцент сделан на механических, дистанционно управляемых и автономных роботизированных системах, а также их интеграции с современными средствами навигации и связи.

Материалы и методы исследования.

Современные роботизированные комплексы для разминирования являются важным элементом инженерных войск и гуманитарных организаций, занимающихся разминированием опасных территорий. В последние десятилетия они значительно повысили безопасность и эффективность операций по обезвреживанию минных заграждений и самодельных взрывных устройств (СВУ) [7]. Эти системы делятся на

несколько категорий в зависимости от принципа работы и используемых технологий. В данной главе рассматриваются основные подходы к классификации роботизированных комплексов и ключевые технологии, применяемые в современных решениях.

Классификация систем по принципу работы.

Роботизированные комплексы для разминирования подразделяются на три основные категории в зависимости от их функциональности и принципа действия: наземные платформы с механическим разминированием, дистанционно управляемые и автономные роботы, а также беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

Наземные платформы с механическим разминированием представляют собой тяжелую технику, предназначенную для уничтожения минных заграждений механическим воздействием [8]. Они оснащены вращающимися фрезами, плугами и катками, которые физически разрушают мины, предотвращая их детонацию. Данные системы эффективны при зачистке больших территорий, однако имеют ограничения в сложных ландшафтах и требуют значительных затрат на техническое обслуживание.

Дистанционно управляемые и автономные роботы предназначены для точечного обнаружения и обезвреживания мин и СВУ [9]. Они оснащены манипуляторами, сенсорами и системами навигации, позволяющими им работать в опасных условиях без непосредственного участия человека. Управление может осуществляться оператором на расстоянии или системой искусственного интеллекта, анализирующей данные в реальном времени. Эти роботы обладают высокой точностью, но могут сталкиваться с проблемами автономности и ограниченного радиуса действия.

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в разминировании позволяет проводить разведку минных полей с воздуха, что значительно снижает риск для саперов [10]. БПЛА оснащены инфракрасными, магнитными и оптико-электронными сенсорами, которые позволяют выявлять потенциальные угрозы без необходимости физического контакта. Их применение особенно актуально в зонах с затрудненным доступом, но основными ограничениями остаются ограниченный грузоподъемный потенциал и необходимость точной калибровки сенсоров.

Ключевые технологии, используемые в современных комплексах.

Развитие роботизированных комплексов во многом определяется технологическим прогрессом в области обнаружения, навигации и методов уничтожения взрывных устройств. Современные системы разминирования включают несколько ключевых технологических направлений.

Оптико-электронные системы обнаружения играют важную роль в обнаружении мин и СВУ [11]. Они включают камеры высокого разрешения, тепловизоры и лазерные сканеры, которые позволяют определять взрывные устройства по визуальным и тепловым признакам. Эти технологии улучшают точность обнаружения, но могут испытывать затруднения при работе в сложных погодных условиях или на пересеченной местности.

Магнитные и радиочастотные детекторы используются для выявления металлических элементов мин и скрытых взрывных устройств [12]. Данные системы эффективны при обнаружении традиционных мин, содержащих металлические компоненты, но могут испытывать трудности при работе с неметаллическими СВУ. Радиочастотные детекторы позволяют выявлять электронные компоненты минных взрывателей, что делает их ценным инструментом при обнаружении современных самодельных устройств.

Гидропневматические и взрывные методы уничтожения включают механизмы разрушения мин и СВУ без необходимости их непосредственного обезвреживания [13]. Гидропневматические системы создают мощную струю жидкости под высоким давлением, способную разрушать детонаторы взрывных устройств. Взрывные методы предполагают использование накладных зарядов, которые вызывают детонацию мин на безопасном расстоянии. Эти методы отличаются высокой эффективностью, но требуют точных расчетов и соблюдения мер предосторожности.

Современные системы разминирования постоянно совершенствуются, интегрируя новые технологии обнаружения и уничтожения взрывных устройств [14]. Автоматизация процессов, развитие систем искусственного интеллекта и повышение автономности платформ позволяют значительно повысить эффективность операций по разминированию, снижая риск для саперов и минимизируя время проведения работ. Несмотря на существующие ограничения, дальнейшие исследования и разработки в этой области приведут к созданию еще более надежных и адаптивных систем, способных работать в самых сложных условиях.

Анализ опыта применения роботизированных комплексов в разных странах.

Современные технологии роботизированного разминирования активно применяются в различных странах, где проблема минной угрозы остается актуальной. Эти технологии способствуют повышению эффективности и безопасности операций по очистке территорий от мин и самодельных взрывных устройств (СВУ). В данном разделе анализируются программы разминирования, реализуемые ведущими государствами, а также роль международных гуманитарных организаций в разминировании [15].

Программы разминирования с применением роботов США.



Рисунок 1 – Применение мобильного робота TALON в разминировании

США являются мировым лидером в разработке и применении роботизированных комплексов для разминирования. Американские военные активно используют системы, такие как TALON на рисунке 1 и PackBot, в зонах боевых действий и в гуманитарных миссиях [16]. TALON, разработанный компанией Foster-Miller, представляет собой многофункционального робота, оснащенного видеокамерами, датчиками и манипулятором для работы с подозрительными объектами. Он доказал свою эффективность в Ираке и Афганистане, где использовался для разведки местности и обнаружения СВУ. Однако его зависимость от оператора и ограниченная автономность остаются проблемами при его применении.

PackBot, созданный компанией iRobot, отличается высокой мобильностью и возможностью проникновения в труднодоступные зоны [17]. Он активно использовался американскими военными в городских условиях, где позволял оперативно выявлять мины и другие угрозы. Однако одним из недостатков PackBot является его относительно небольшое время работы от аккумулятора, что ограничивает длительность операций.

Европейские разработки.

Европейские страны активно развивают собственные технологии разминирования в рамках международного сотрудничества. Одним из наиболее значимых проектов является TMRP (Tactical Mobile Robotic Platform), направленный на создание мобильных

роботизированных систем для обнаружения и уничтожения мин [18]. Эти платформы оснащены датчиками, работающими на основе машинного обучения, что позволяет им адаптироваться к различным условиям местности.

Другим важным направлением является проект iMUGS, который представляет собой модульную платформу с возможностью интеграции различных систем, включая БПЛА и автономные наземные роботы [19]. Разработка направлена на создание единой системы взаимодействия между различными роботизированными комплексами, что значительно повышает координацию действий на минных полях.

Применение роботизированных комплексов «Уран-6», «Платформа-М».



Рисунок 2 – Пример механического разминирования роботизированным комплексом «Уран-6»

Россия активно разрабатывает и внедряет роботизированные комплексы для разминирования как в военных, так и в гуманитарных операциях. Одним из наиболее известных решений является «Уран-6» – дистанционно управляемый гусеничный робот, предназначенный для механического разминирования [20], показан на рисунке 2. Он активно использовался в Сирии для очистки освобожденных территорий. Основным преимуществом «Уран-6» является его способность работать в сложных условиях, однако его масса и габариты ограничивают мобильность в труднопроходимых зонах.

Еще одним перспективным направлением является «Платформа-М», роботизированная система, способная выполнять задачи по обнаружению и уничтожению мин. Этот комплекс разрабатывается с возможностью интеграции с различными видами вооружений, что делает его универсальным средством для инженерных войск. Однако сложность управления и высокие требования к подготовке операторов остаются вызовами при его внедрении.

Новые тенденции в разработке автономных систем разминирования Китая.

Китай инвестирует значительные ресурсы в разработку автономных систем разминирования, ориентируясь на интеграцию искусственного интеллекта и машинного зрения. Разработки ведутся в области автономных наземных комплексов, таких как HJ-300, который оснащен системой автоматического обнаружения мин. Данный робот использует комбинацию магнитных и инфракрасных сенсоров для определения местоположения взрывных устройств.

Другим значимым проектом является XJ-01, платформа, сочетающая возможности наземных и воздушных сенсоров. Этот комплекс оснащен беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), которые осуществляют аэроразведку минных полей и передают данные на наземные модули. Такой подход позволяет значительно повысить точность картографирования минных полей и ускорить процесс разминирования. Однако высокая

стоимость и сложность обслуживания остаются ключевыми вызовами для массового внедрения данной технологии.

Международные гуманитарные миссии.

После завершения вооруженных столкновений ООН, ОДКБ и НАТО играют ключевую роль в разминировании территорий, пострадавших от военных конфликтов. Организации внедряют современные технологии и финансируют программы по разминированию в зонах повышенной опасности. В частности, HALO Trust, некоммерческая организация, использует роботизированные комплексы для гуманитарного разминирования в Африке и на Ближнем Востоке. А также исследовательский центр GICHD (Geneva International Centre for Humanitarian Demining) разрабатывает стандарты и методологии для внедрения роботизированных решений в данной области. Эти системы позволяют значительно ускорить процесс очистки территорий от взрывоопасных объектов.

Результаты и их обсуждение.

Применение датчиков обнаружения в роботизированных системах разминирования.

В современных роботизированных системах, предназначенных для задач разминирования, особую роль играют датчики обнаружения. Именно они обеспечивают возможность выявления потенциально опасных объектов — таких как мины, снаряды или самодельные взрывные устройства — на расстоянии и без физического контакта. Это позволяет значительно снизить риски для операторов и увеличить эффективность обследования сложных участков местности.

Определение типов датчиков обнаружения.

На данный момент существует множество типов датчиков, но на практике чаще всего применяются три основных вида: индуктивные, оптические и ультразвуковые. Каждый из них имеет свои особенности, преимущества и ограничения, поэтому выбор подходящего типа датчика зависит от условий эксплуатации и характера целей.

- Индуктивные датчики работают на основе электромагнитного поля и реагируют исключительно на металлические объекты. Они незаменимы при поиске противопехотных мин или металлических осколков вблизи поверхности. Например, в мобильных платформах часто используются промышленные модели вроде Bosch IMB12, способные точно фиксировать небольшие металлические фрагменты в грунте.

- Оптические датчики функционируют по принципу отражения света: излучают инфракрасный или лазерный луч и измеряют интенсивность отражённого сигнала. Такие устройства чувствительны и позволяют обнаруживать даже неметаллические предметы. Однако их точность может снижаться в условиях пыли, тумана или яркого света. В качестве примера можно привести популярный инфракрасный датчик Sharp GP2Y0A21YK0F, который используется в лёгких роботах-разведчиках.

- Ультразвуковые датчики измеряют расстояние до объекта на основе времени пролёта звуковой волны. Они менее чувствительны к освещённости и хорошо подходят для работы в помещениях или при слабой видимости. Одним из наиболее доступных и часто используемых решений является модуль HC-SR04, позволяющий сканировать объекты на расстояниях до нескольких метров.

На практике каждый тип датчика имеет определённую "зону уверенного обнаружения", которая зависит от материала цели, условий среды и угла установки. Поэтому в современных роботизированных системах часто применяется комбинация нескольких датчиков. Они объединяются в мультисенсорные модули с алгоритмами фильтрации и слияния данных.

Принцип работы индуктивного датчика обнаружения показан на рисунке 3.

Индуктивные датчики являются одними из наиболее надёжных средств обнаружения металлических объектов. Принцип их действия основан на создании переменного электромагнитного поля с помощью катушки. Когда в зону действия такого поля попадает металлический предмет, в нём индуцируются вихревые токи, которые создают собственное

поле, взаимодействующее с полем катушки. Это приводит к изменению амплитуды или частоты колебаний, что и фиксируется как признак присутствия объекта. Принцип вычисления выходного сигнала можно описать формулой:

$$U_{\text{выход}} = A * k \quad (1)$$

Где: $U_{\text{выход}}$ – выходной сигнал; A – амплитуда переменного тока, генерируемого катушкой; k – коэффициент затухания сигнала, уменьшающийся при появлении металла вблизи.

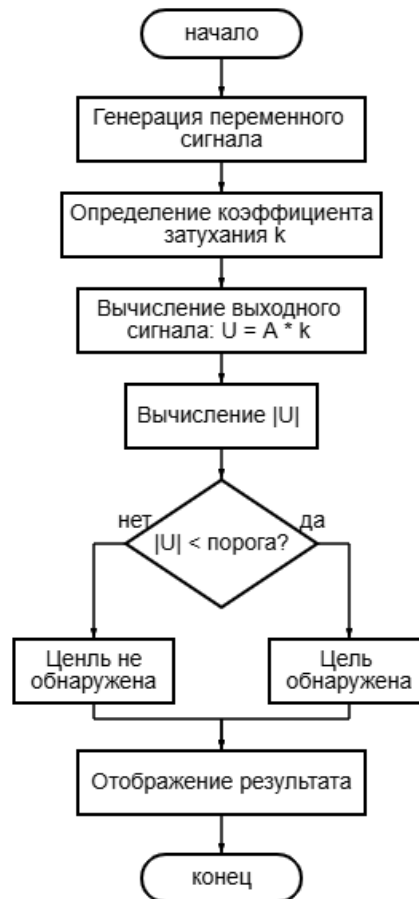


Рисунок 3 - Алгоритм работы индуктивного датчика

Принцип работы оптического датчика обнаружения показан на рисунке 4.

Оптические датчики используются для определения наличия объектов за счёт анализа отражённого света. Принцип их работы основан на том, что излучаемый инфракрасный или лазерный луч отражается от поверхности объекта и возвращается к приёмнику. По интенсивности отражённого сигнала можно судить о наличии и расстоянии до цели.

Наиболее часто оптические сенсоры применяются в робототехнике для обнаружения препятствий, позиционирования, а также в задачах разминирования — при визуальном сканировании поверхности.

Математическую модель сигнала можно описать как интенсивность отражённого сигнала обратно пропорциональна квадрату расстояния:

$$S(d) = \frac{A}{d^2} \quad (2)$$

где: $S(d)$ – сила отражённого сигнала; A – мощность исходного сигнала; d – расстояние до объекта.

При уменьшении расстояния сила отражённого сигнала возрастает, что позволяет надёжно фиксировать присутствие объекта в пределах определённого диапазона.

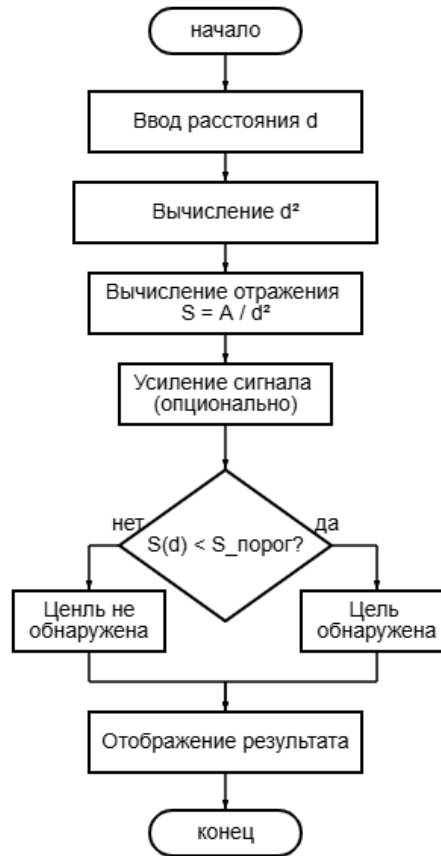


Рисунок 4 – Алгоритм работы оптического датчика

Принцип работы ультразвукового датчика обнаружения.

Ультразвуковые датчики используются для определения расстояния до объектов на основе анализа времени распространения звуковой волны. Датчик испускает акустический импульс в диапазоне 20–40 кГц и измеряет время, через которое отражённый сигнал возвращается к приёмнику. Это время прямо пропорционально расстоянию до объекта.

Такие датчики широко применяются в системах разминирования, особенно в условиях слабой освещённости, запылённости или полного отсутствия визуального контакта с целью. Расстояние до объекта определяется по времени пролёта звука туда и обратно:

$$t = \frac{2*d}{v} \quad (3)$$

Где: v – скорость звука в воздухе, обычно $v = 343\text{м/с}$ при температуре 20°C

Из рисунка 7 видно, что пороговое значение времени используется для принятия решения о наличии цели.

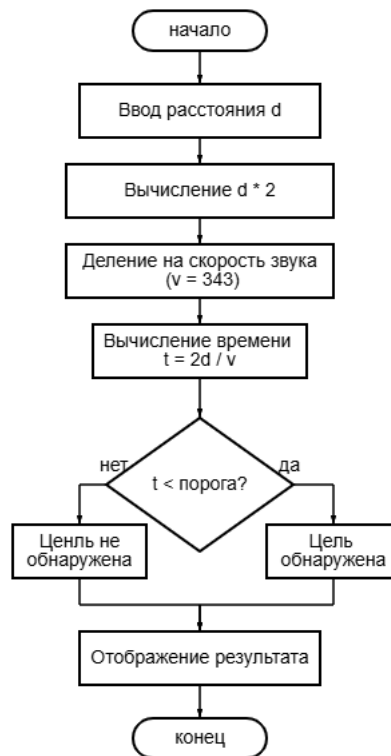


Рисунок 5 – Алгоритм работы ультразвукового датчика

Математического моделирования датчиков обнаружения.

Для анализа характеристик различных типов датчиков обнаружения была построена визуальная модель в среде MATLAB Simulink. В этой модели воспроизведены три датчика — индуктивный, оптический и ультразвуковой — в условиях, приближённых к идентичным по параметрам эксплуатации: расположение объектов, их свойства и расчёт времени отклика проводились по одинаковым принципам.

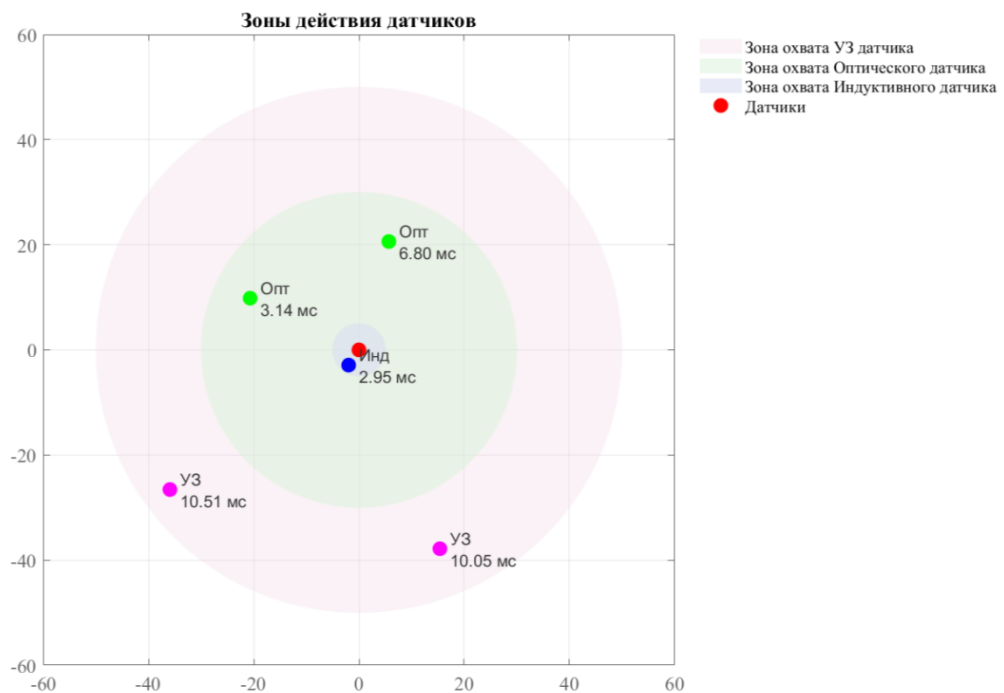


Рисунок 6 – Диаграмма моделирования зоны действия датчиков

На рисунке 6 представлена диаграмма, где каждая окружность обозначает зону уверенного обнаружения соответствующего датчика. Внутри этих зон размещены целевые объекты, а рядом указано рассчитанное время отклика (в миллисекундах), за которое конкретный тип датчика фиксирует присутствие цели.

В ходе моделирования были получены следующие наблюдения:

- Индуктивный датчик обладает самой высокой точностью на малых расстояниях и минимальным временем реакции, но его способность к обнаружению ограничена объектами, содержащими металл.

- Оптический датчик обеспечивает хорошую чувствительность на средней дистанции и может обнаруживать неметаллические цели, однако его точность снижается при изменении условий освещения и наличии пыли.

- Ультразвуковой датчик показывает наибольшую зону покрытия, но с большей задержкой, и подвержен искажению сигнала при наличии мягких или звукопоглощающих материалов.

Анализ полученных результатов показывает, что каждый тип датчика обладает своими структурными преимуществами и ограничениями, и оптимальное решение для задач обнаружения является комбинирование работа датчиков.

Комбинированная система обнаружения.

Для повышения надёжности и точности обнаружения целей в условиях, где одна технология может оказаться недостаточной, в роботизированных системах разминирования нередко применяются комбинированные сенсорные решения. В данной работе была реализована система, объединяющая индуктивный и ультразвуковой датчики, каждый из которых отвечает за свой диапазон расстояний и тип цели.

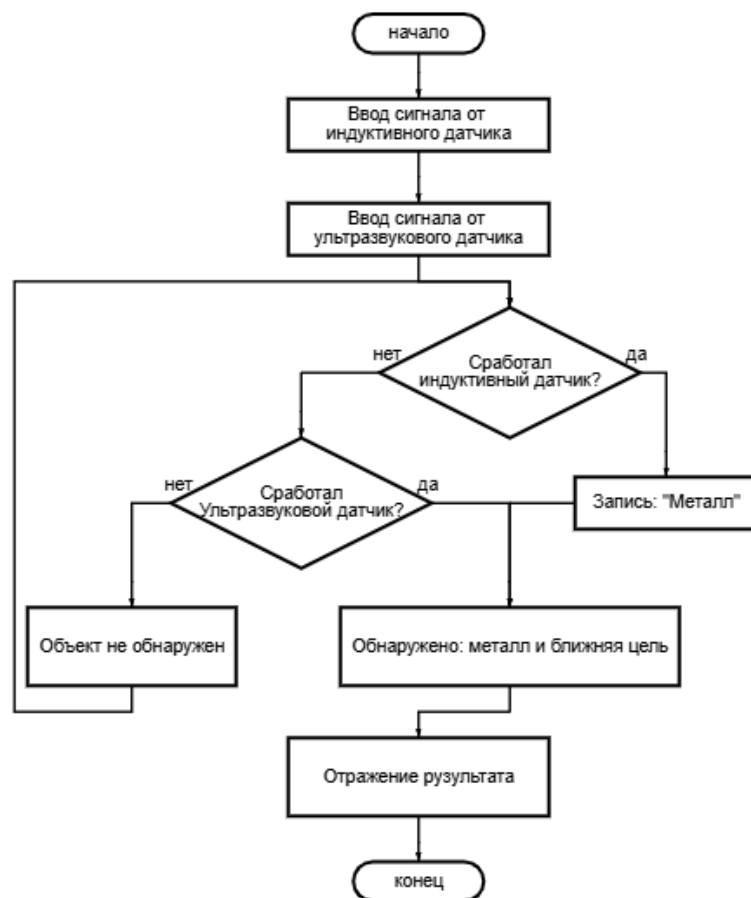


Рисунок 7 – Алгоритм работы комбинированной системы обнаружения

Индуктивный датчик на рисунке 7 особенно хорошо реагирует на металлические объекты, расположенные вблизи — его зона уверенного обнаружения ограничивается, как правило, несколькими сантиметрами. В то же время ультразвуковой датчик способен определять объекты на более больших расстояниях, независимо от их материала. Благодаря такой комбинации система получает возможность реагировать как на ближние металлические цели, так и на неметаллические объекты на большей дистанции.

Алгоритм функционирует следующим образом:

- 1) Система получает значения расстояния от индуктивного и ультразвукового датчиков.
- 2) При срабатывании индуктивного датчика (при $d < 5$) происходит моментальная фиксация металлической цели.
- 3) Если индуктивный датчик не сработал, но ультразвуковой сигнал прошёл в пределах допустимого временного окна ($d \leq 0.2$ м, или $t \leq 2d / v$ при $v = 343$ м/с), то считается, что обнаружена неметаллическая ближняя цель.
- 4) В противном случае система делает вывод об отсутствии цели.

Результаты обрабатываются по логике условий AND и NOT, что позволяет гибко реагировать на сигналы от сенсоров. Для формализации логики система использует логические выражения:

- Индуктивное срабатывание:

$$L_{ind} = (d < d_{ind}) \tag{4}$$

- Ультразвуковое срабатывание:

$$L_{ultr} = (d < d_{ultr}) \tag{5}$$

- Объединённые логические условия:

Если индуктивный не сработал, а ультразвуковой сработал, значит цель не металлическая и находится на средней дистанции

$$\text{УЗ только} = \neg L_{ind} \wedge L_{ultr} \tag{6}$$

Где: L_{ind} – сигнал от индуктивного датчика; \neg - логическое «НЕ»; \wedge - логическое «И».

Если оба датчика ничего не зафиксировали, то поблизости нет объекта

$$\text{Ничего не обнаружено} = \neg L_{ind} \wedge \neg L_{ultr} \tag{7}$$

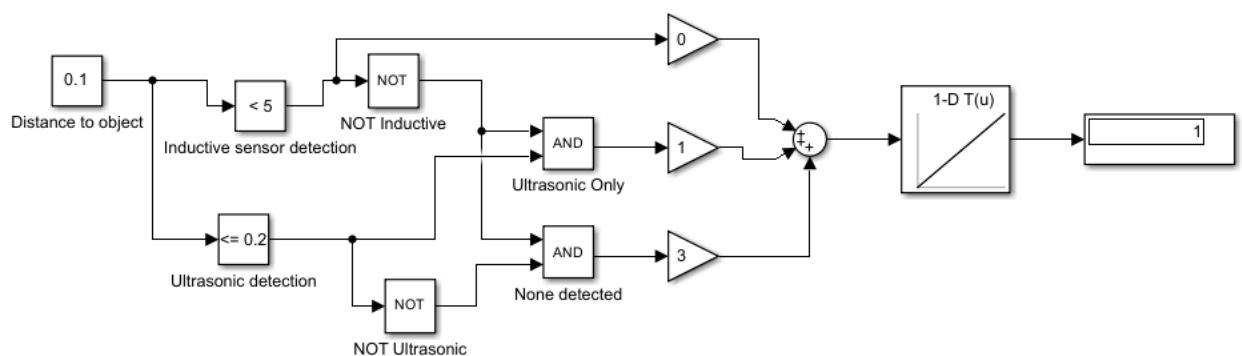


Рисунок 8 – Модель комбинированной системы обнаружения в Simulink

В модели на рисунке 8 реализована логика обработки сигнала в зависимости от расстояния до цели. Все условия представлены с помощью логических блоков (AND, NOT,

Relational Operator), а результат классификации поступает на блок 1-D Lookup Table, где происходит отображение итогов:

- значение 1 означает "обнаружен металл",
- 2 — "обнаружен объект (ультразвук)",
- 3 — "объект не обнаружен".

Таким образом, такая система позволяет адаптироваться под различные типы целей и условия местности, что особенно важно для роботизированных комплексов, работающих в реальных полевых условиях. Комбинированный подход не только повышает надёжность, но и минимизирует количество ложных срабатываний при обследовании территории.

Перспективы адаптации мирового опыта для вооружённых сил Казахстана.

Учитывая проведённый анализ сенсорных систем и реализацию комбинированных алгоритмов обнаружения в среде MATLAB Simulink, становится очевидным, что технологии разминирования можно не только исследовать, но и адаптировать под реальные условия с опорой на международный опыт. Сегодня, в условиях возрастающих угроз, модернизация инженерных подразделений вооружённых сил Казахстана требует интеграции роботизированных комплексов, способных выполнять задачи по обнаружению и нейтрализации взрывоопасных объектов с высокой степенью автономности и надёжности.

Опираясь на мировую практику, Казахстан имеет возможность не просто использовать готовые решения, но и создавать собственные адаптированные системы. Локализация передовых технологий, таких как мультисенсорные модули, основанные на индуктивных, ультразвуковых и оптических принципах, позволит адаптировать технику к климатическим условиям, характерным для степных и горных регионов страны. Примеры успешного применения подобных технологий в армиях США, ЕС, Китая и России подтверждают их эффективность как в боевых, так и в гуманитарных миссиях.

Возможные направления включают:

- лицензированное производство роботизированных платформ с дальнейшей доработкой под специфические условия Казахстана;
- создание совместных предприятий с зарубежными производителями;
- интеграцию сенсорных модулей в существующую технику, включая беспилотные наземные и воздушные аппараты.

Также стоит уделить внимание на развитие отечественных интеллектуальных роботизированных комплексов, способных не только выполнять разминирование, но и осуществлять разведку, охрану объектов и сопровождение колонн. Интеграция алгоритмов машинного обучения и обработки данных с датчиков в реальном времени существенно повысит эффективность и снизит уровень человеческого участия в опасных зонах.

Развитие собственной индустрии роботизированных комплексов для разминирования может обеспечить Казахстану не только военную независимость, но и перспективу выхода на международный рынок высокотехнологичных решений. Перспективными направлениями являются создание автономных наземных платформ, оснащённых системами искусственного интеллекта и машинного обучения, разработка мобильных комплексов, эффективных в степных и горных районах, а также интеграция современных сенсорных технологий. Кроме того, многофункциональные платформы, выполняющие не только разминирование, но и разведку, патрулирование и охрану объектов, могут существенно повысить уровень автоматизации военных операций. Достижение этих целей потребует комплексной поддержки со стороны государства, включая финансирование, создание нормативно-правовой базы и подготовку специалистов.

Интеграция роботизированных комплексов в военную инфраструктуру Казахстана должна включать развитие систем управления и связи, позволяющих эффективно координировать работу автономных платформ с инженерными подразделениями и беспилотными летательными аппаратами. Для успешного внедрения также необходимо

обеспечить обучение личного состава работе с новыми технологиями, развитие специализированных испытательных полигонов и создание сервисных центров для ремонта и технического обслуживания оборудования. Введение роботизированных систем позволит не только повысить боеспособность инженерных войск, но и минимизировать риски для саперов, сократить время разминирования территорий и улучшить координацию между подразделениями. Развитие отечественных технологий и их интеграция в вооруженные силы Казахстана предоставят стране возможность занять лидирующие позиции в области военных роботизированных систем и повысить общий уровень технологической независимости.

Заключение.

Анализ мирового опыта разработки и внедрения роботизированных комплексов для разминирования показывает, что такие технологии значительно повышают безопасность и эффективность операций по очистке территорий от мин и самодельных взрывных устройств. В ведущих странах, таких как США, Россия, Китай и государства Европейского Союза, активно применяются автономные и дистанционно управляемые платформы, оснащенные современными сенсорами, системами машинного обучения и интегрированные с беспилотными летательными аппаратами. Эти системы доказали свою эффективность в боевых условиях, гуманитарных миссиях и миротворческих операциях, что подтверждает их значимость для современных вооруженных сил.

Для Казахстана внедрение подобных систем открывает широкие перспективы в области оборонных технологий. Локализация передовых решений, таких как российский «Уран-6», американский TALON, европейская платформа iMUGS и китайский XJ-01, позволит адаптировать их под климатические и географические условия страны, а также повысить технологическую независимость. Одновременно с этим развитие отечественных решений, включая роботизированные платформы на базе БТР-80, квадроциклов и автономных наземных комплексов, обеспечит Казахстану возможность формирования собственного научно-технического потенциала в данной сфере.

Предлагаемое техническое решение в данной работе, стала комбинированная система обнаружения, основанная на использовании индуктивных и ультразвуковых датчиков. Такой подход позволяет повысить надёжность обнаружения, за счёт компенсации слабых сторон каждого отдельного сенсора. Модель этой системы была реализована в среде MATLAB Simulink, где проведённая логика продемонстрировала возможность точного определения объектов разного типа и на разных расстояниях. Использование подобных комбинированных сенсорных модулей на мобильных платформах позволит значительно повысить эффективность разминирования и снизить риски для личного состава.

Для успешного внедрения роботизированных систем разминирования в Казахстане необходимо учитывать ряд факторов: интеграцию с существующими военными структурами, развитие инфраструктуры для тестирования и технического обслуживания, а также подготовку специалистов, способных управлять и обслуживать такую технику. Важную роль играет и развитие законодательной базы, регулирующей использование автономных систем в военных и гуманитарных операциях. Инфраструктурные улучшения, включая модернизацию испытательных полигонов и создание централизованных хранилищ данных, позволят обеспечить эффективную координацию действий и повысить оперативность разминирования.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование алгоритмов автономного управления, повышение точности сенсорных систем и улучшение устойчивости роботизированных комплексов к экстремальным условиям эксплуатации. Кроме того, важно изучить возможности интеграции данных технологий с перспективными системами управления войсками и элементами искусственного интеллекта, что позволит существенно расширить их функциональные возможности. Современные тренды в области военной робототехники также показывают, что интеграция беспилотных летательных

аппаратов и роботизированных наземных платформ в единые комплексы позволит повысить общую эффективность разминирования.

Список литературы

1. Саймон П., Де Конинк С. (2014). Системы управления качеством в программах противоминной деятельности. Журнал по уничтожению обычных вооружений, 18(12).
2. Смит Дж., Браун П. (2021). Достижения в области роботизированного обнаружения мин. Журнал оборонных технологий.
3. Колин В. (2009). Европейское оборонное агентство — не ящик Пандоры, а великий эксперимент доброй воли. Оборона и стратегия, 9, 163–165.
4. Чжай Ч., Чжан П., Сюй Х., Юань С., Чжоу Л., У Ж. (2023). Применение и перспективы роботов в вооружённых силах США. 8-я Азиатско-Тихоокеанская конференция по интеллектуальным робототехническим системам (ACIRS), 24–28.
5. Кривцун В. (2024). Улучшение классификации дистанционно управляемых (роботизированных) средств разминирования. Научный журнал Национальной академии Национальной гвардии «Честь и закон».
6. Орынбет П., Разакова Д. (2024). Развитие и потенциал роботизации и автоматизации в автомобильной промышленности Казахстана: библиографический и аналитический обзор. Вестник университета «Туран».
7. Кыба Д., Дробот О., Веретильнык О., Харченко О. (2024). Некоторые аспекты процедуры оценки машин для гуманитарного разминирования. Научные труды ГНДИ испытаний и сертификации вооружения и военной техники.
8. Кривцун В., Нанивская Л. (2023). Факторы, влияющие на процесс разминирования. Журнал научных трудов «Социальное развитие и безопасность».
9. Ким Д., Манджунат П., Адэнсиран Э., Дэвис Дж. (2024). Схема сбора данных для разработки будущих автономных манипуляторов для военных приложений. 21-я Международная конференция по вездесущим роботам (UR), 2024.
10. Ян Ц., Инь Ю., Чэнь С., Лю Ю. (2021). Автономное исследование и навигация беспилотных катеров по борьбе с минами в сложной неизвестной среде. 33-я Китайская конференция по управлению и принятию решений (CCDC), 2021.
11. Фостер Л. (2021). Оптоэлектронные датчики для обнаружения СВУ. Журнал военной инженерии.
12. Лю Х., Чжао Ч., Чжу Цз., Гэ Цз., Дун Х., Лю Чж., Мрад Н. (2021). Активное обнаружение мелких целей, подобных НВП, с помощью измерения электромагнитных откликов с массивом магнитно-индуктивных датчиков. Журнал датчиков IEEE, 21, 23558–23567. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3093625
13. Петришор С., Симион М., Барсан Г., Ханку О. (2023). Гусеничный робот для гуманитарного разминирования: проектирование и динамическое моделирование. Журнал Machines, 11(5). DOI: 10.1109/JSEN.2021.3093625
14. Хэ С., Лу М., Лю Ж., Чэнь Чж. (2022). Схема многофункционального поискового минного робота на основе инерциальной навигации. Материалы SPIE – Международное общество оптической инженерии, 12161, 121610В-121610В-6.
15. Ким Д., Манджунат П., Адэнсиран Э., Дэвис Дж. (2024). Схема сбора данных для разработки будущих автономных манипуляторов для военных приложений. 21-я Международная конференция по вездесущим роботам (UR), 208–213.
16. Афирацакун Н., Ливсакпайбун С. (2020). Управление движением iRobot Create2 на основе сенсоров. Материалы конференции PECTI.
17. Фостер Л. (2022). TALON: многофункциональный робот для разминирования. Журнал военной робототехники.
18. Паллави Н.Р., Аканкш Г.С., Акаш К., Бхаргави Ш.Х., Мегана Р. (2024). Военное роботизированное наблюдение с использованием металлодетектора для обнаружения

наземных мин. Вторая международная конференция по информационным технологиям (ИСАИТ), 1–5.

19. Де Каббер Ж., Ле Флеше Э., Ла Грапп А., Дорофтэй Д. (2023). Взаимодействие между человеком и агентом в задаче пополнения ресурсов с участием беспилотных наземных систем. В: Факторы человека в роботах, дронах и беспилотных системах.

20. Глибев В., Жадан В., Королов В. (2022). Разработка тяжёлого боевого наземного робототехнического комплекса на базе бронетранспортёра БТР-4Е. Военно-технический сборник.

References

1. Simon, P., & De Coninck, S. (2014). Quality Management Systems in Mine Action Programs. *Journal of Conventional Weapons Destruction*, 18(12).

2. Smith, J., & Brown, P. (2021). Advancements in Mine Detection Robotics. *Journal of Defense Technology*.

3. Kolín, V. (2009). The European Defence Agency, Not a Pandora's Box but a Grand Experiment of Goodwill. *Obrana A Strategie (Defence and Strategy)*, 9, 163–165.

4. Zhai, C., Zhang, P., Xu, H., Yuan, X., Zhou, L., & Wu, R. (2023). The Application and Inspiration of Robots in the US Military. *Proceedings of the 8th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS)*, 24–28.

5. Kryvtsun, V. (2024). Improvement of the Classification of Remote-Controlled (Robotic) Means (Complexes) of Demining. *The Scientific Journal of the National Academy of National Guard "Honor and Law"*.

6. Orynbet, P., & Razakova, D. (2024). Development and Potential of Robotisation and Automation in Kazakhstan's Automobile Industry: A Bibliographical and Analytical Review. *Bulletin of "Turan" University*.

7. Kyba, D., Drobot, O., Veretilnyk, O., & Kharchenko, O. (2024). Certain Aspects of the Assessment Procedure of Machines for Humanitarian Demining. *Scientific Works of the State Research Institute for Testing and Certification of Arms and Military Equipment*.

8. Krivtsun, V., & Naniivska, L. (2023). Factors Affecting the Demining Process. *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*.

9. Kim, D., Manjunath, P., Adénxíran, E., & Davis, J. (2024). A Data Collection Scheme to Develop Future Autonomous Manipulation for Military Applications. *Proceedings of the 21st International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, 208–213.

10. Yang, Q., Yin, Y., Chen, S., & Liu, Y. (2021). Autonomous Exploration and Navigation of Mine Countermeasures USV in Complex Unknown Environment. *Proceedings of the 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*.

11. Foster, L. (2021). Optoelectronic Sensors for IED Detection. *Journal of Military Engineering*.

12. Liu, H., Zhao, C., Zhu, J., Ge, J., Dong, H., Liu, Z., & Mrad, N. (2021). Active Detection of Small UXO-Like Targets Through Measuring Electromagnetic Responses With a Magneto-Inductive Sensor Array. *IEEE Sensors Journal*, 21(20), 23558–23567. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3107842ResearchGate>

13. Petrişor, S. M., Simion, M., Bârsan, G., & Hancu, O. (2023). Humanitarian Demining Serial-Tracked Robot: Design and Dynamic Modeling. *Machines*, 11(5), 548. <https://doi.org/10.3390/machines11050548ScienceDirect+3MDPI+3MDPI+3>

14. He, X., Lu, M., Liu, R., & Chen, Z. (2022). The Scheme of Mine Search Multifunctional Robot Based on the Inertial Navigation. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 12161, 121610B–121610B-6.

15. Kim, D., Manjunath, P., Adénxíran, E., & Davis, J. (2024). A Data Collection Scheme to Develop Future Autonomous Manipulation for Military Applications. *Proceedings of the 21st International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, 208–213.

16. Aphiratsakun, N., & Liwsakphaiboon, S. (2020). Path Control iRobot Create2 Based Sensors. Proceedings of PETI.
17. Foster, L. (2022). TALON: The Multi-Purpose Demining Robot. Military Robotics Journal.
18. Pallavi, N. R., Akanksh, G. S., Akash, K., Bharghavi, S. H., & Meghana, R. (2024). Robotic Military Surveillance Using Metal Detector for Land Mine Bomb Detection. Proceedings of the Second International Conference on Advances in Information Technology (ICAIT), 1–5.
19. De Cubber, G., Le Flecher, E., La Grappe, A., & Doroftei, D. (2023). Human-Agent Teaming Between Soldiers and Unmanned Ground Systems in a Resupply Scenario. In Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems.
20. Glibov, V., Zhadan, V., & Korolov, V. (2022). The Development of a Heavy Class Combat Robotic Ground Complex Based on the BTR-4E Armored Personnel Carrier. Military Technical Collection.

МИНАДАН ТАЗАРТУҒА АРНАЛҒАН РОБОТТЫҚ КЕШЕНДЕРДІ ӘЗІРЛЕУДІҢ ӘЛЕМДІК ТӘЖІРИБЕСІН ТАЛДАУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ҚОЛДАНУ

***Аңдатпа.** Мақалада миналардан және қолдан жасалған жарылғыш құрылғылардан аумақтарды тазалаудың қауіпсіздігі мен тиімділігін арттыруға бағытталған минадан тазартуға арналған роботты кешендерді әзірлеу мен енгізудің әлемдік тәжірибесіне талдау жасалды. Автономды және қашықтан басқарылатын жүйелерде қолданылатын заманауи технологиялар, соның ішінде сенсорлық кешендер, навигациялық жүйелер, жасанды интеллект элементтері және ұиқышсыз ұшу аппараттарымен интеграция қарастырылады.*

Зерттеу әдістемесі қолданыстағы шешімдерді салыстырмалы талдауға, оларды АҚШ, Ресей, Қытай және Еуропалық Одақ мемлекеттері сияқты жетекші елдерде қолдану тәжірибесін зерттеуге, сондай-ақ Жердегі платформаларды, мобильді роботтарды және ұиқышсыз ұшақтарды қоса алғанда, роботтық кешендердің әртүрлі түрлерінің тиімділігін бағалауға негізделген.

Жұмыстың практикалық бөлігі аясында минадан тазарту кезінде объектілерді жіктеудің сенімділігін арттыру мақсатында индуктивті және ультрадыбыстық датчиктерді біріктіретін біріктірілген сенсорлық анықтау жүйесінің математикалық моделі жүзеге асырылды. Даму MATLAB Simulink ортасында ұсынылған және отандық роботтық кешендердің құрамына интеллектуалды сенсорлық модульдерді одан әрі зерттеу және енгізу үшін негіз бола алады.

Сондай-ақ мақалада отандық роботтандырылған платформаларды әзірлеуді қоса алғанда, Қазақстандағы озық шешімдерді оқшаулау және бейімдеу перспективалары, өңірдің климаттық және географиялық ерекшеліктерін ескере отырып, шетелдік технологияларды пайдалану мүмкіндігі, сондай-ақ нормативтік-құқықтық базаны жетілдіру, инфрақұрылымды дамыту және осы жүйелерді тиімді енгізу үшін мамандар даярлау қажеттілігі қарастырылған. Автономды технологиялар, сенсорлық жүйелер және оларды әскери және гуманитарлық салаларға біріктіру саласындағы одан әрі зерттеулердің маңыздылығы атап өтіледі.

***Түйін сөздер:** минадан тазарту, миналар, роботты кешендер, қолдан жасалған жарылғыш құрылғылар, автономды жүйелер.*

ANALYSIS OF GLOBAL EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT OF ROBOTIC SYSTEMS FOR DEMINING AND THEIR APPLICATION

***Abstract.** The article analyzes the world experience in the development and implementation of robotic mine clearance systems aimed at improving the safety and effectiveness of clearing*

territories of mines and improvised explosive devices. Modern technologies used in autonomous and remotely controlled systems, including sensor complexes, navigation systems, artificial intelligence elements and integration with unmanned aerial vehicles, are considered.

The research methodology is based on a comparative analysis of existing solutions, studying the practice of their application in leading countries such as the United States, Russia, China and the European Union, as well as evaluating the effectiveness of various types of robotic systems, including ground platforms, mobile robots and unmanned aerial vehicles.

As part of the practical part of the work, a mathematical model of a combined sensor detection system combining inductive and ultrasonic sensors has been implemented to increase the reliability of object classification during mine clearance. The development is presented in the MATLAB Simulink environment and can serve as a basis for further research and implementation of intelligent sensor modules in domestic robotic complexes.

The article also discusses the prospects for localization and adaptation of advanced solutions in Kazakhstan, including the development of domestic robotic platforms, the possibility of using foreign technologies considering the climatic and geographical features of the region, as well as the need to improve the regulatory framework, develop infrastructure and train specialists for the effective implementation of these systems. The importance of further research in the field of autonomous technologies, sensor systems and their integration into the military and humanitarian spheres is emphasized.

Keywords: mine clearance, mines, robotic complexes, improvised explosive devices, autonomous systems.

Авторлар туралы мәлімет

Ибраим Мерей Сатыпалдыұлы	Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, «Аспап жасау» мамандығы бойынша докторант, Байланыс және ғарыштық инженерия институты, Алматы қ, Қазақстан, E-mail: m.ibraim@aes.kz
Мырзабеков Кенжебек Мырзабекович	Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, «Ғарыштық техника және технологиялар» мамандығы бойынша докторант, Байланыс және ғарыштық инженерия институты, Алматы қ, Қазақстан, E-mail: k.myrzabekov@aes.kz
Оралбек Жанай Жанқызы	Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, «Ғарыштық техника және технологиялар» мамандығы бойынша магистрант, Байланыс және ғарыштық инженерия институты, Алматы қ, Қазақстан, E-mail: zha.oralbek@aes.kz

Сведения об авторах

Ибраим Мерей Сатыпалдыұлы	Докторант по специальности «Приборостроение», Институт коммуникации и космической инженерии, Алматинский университет энергетике и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Казахстан, E-mail: m.ibraim@aes.kz
Мырзабеков Кенжебек Мырзабекович	Докторант по специальности «Космическая техника и технологии», Институт коммуникации и космической инженерии, Алматинский университет энергетике и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Казахстан, E-mail: k.myrzabekov@aes.kz
Оралбек Жанай Жанқызы	Магистрант по специальности «Космическая техника и технологии», Институт коммуникации и космической инженерии, Алматинский университет энергетике и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Казахстан, E-mail: zha.oralbek@aes.kz

Information about the authors

Merey Ibraim	Doctoral student in «Instrumentation», Institute of Communication and Space Engineering, Almaty University of power engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: m.ibraim@aes.kz
Kenzhebek Myrzabekov	Doctoral student in «Space engineering and technology», Institute of Communication and Space Engineering, Almaty University of power engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: k.myrzabekov@aes.kz
Zhanay Oralbek	Master's student in «Instrumentation», Institute of Communication and Space Engineering, Almaty University of power engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: zha.oralbek@aes.kz



UDC 621.371

IRSTI 47.05.15

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_12

G.K. Kadirbayeva¹, K.S. Chezhibayeva^{1*}, M.A. Khizirova¹,
A.D. Mukhamejanova¹

¹Non-profit Joint Stock Company "Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named Gumarbek Daukeyev"

*E-mail: k.chezhibayeva@aues.kz

STUDY OF THE EFFECTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS ON THE HUMAN BODY DURING MOBILE PHONE USE

Abstract. *This labour consider the impact of mobile phones, which are part of wireless communication systems, on the human body, as well as the effects of electromagnetic radiation during mobile communication. The labour presents statistical data on mobile phone usage and the types of diseases associated with this usage. A model of the human body was created, and the effects of electromagnetic radiation processes in mobile communication were demonstrated on that model. Additionally, calculations were performed according to international standards for the calculation of electromagnetic radiation.*

Consequence of the research, the dielectric permittivities of brain tissues in the human head at frequencies of 900 and 1800 MHz were compared using SAM mannequins. Additionally, 3D models of the objects under study were created using the CST STUDIO SUITE software, and the impact of electromagnetic radiation on the human head was analyzed based on these models.

The relevance of this article is due to the increasing number of electromagnetic field (EMF) sources, which raises the risk of their impact on humans. Household electrical networks, domestic appliances, video display terminals, power transmission lines, communication and information television and radio devices, radar and navigation stations are just a part of a list of sources emitting EMF at various frequencies, modulations, and intensities. The majority of the population is actually exposed to very high levels of EMF, which are millions of times stronger than the natural magnetic field. Electromagnetic radiation significantly influences the development of pathological reactions in the body. This, in turn, directly leads to a decline in human health. Therefore, understanding the extent of mobile phone effects on the human body and educating the public about its harmful aspects is a key objective.

Keywords: *electromagnetic radiation, mobile phone, dielectric conductivity, electromagnetic field, frequencies, modulations, radar.*

Introduction.

In recent decades, anthropogenic electromagnetic pollution (EMF) has become a priority issue for public health and the environment. In 1996, the World Health Organization (WHO) initiated the International EMF Project, aiming to systematize data on the impact of electromagnetic fields on human health and develop uniform standards [1]. The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) has established exposure limits based on thermal effects [2], but the scientific literature actively discusses the possibility of non-thermal effects not accounted for by existing standards [4].

Systematic reviews and meta-analyses show conflicting results. Thus, a number of studies have documented a link between chronic EMF exposure and oxidative stress, cognitive impairment, and cancer risk [5,6], while other studies find no convincing evidence of the harmful effects of low-level radiation [1]. These discrepancies are explained by differences in methodologies, a limited number of long-term cohort observations, and variability in source characteristics (frequency, modulation, intensity) [3].

The impact of new communication technologies (5G, IoT, Wi-Fi 6) remains particularly relevant, as data are still limited [7,8]. The effects of long-term exposure to low doses of EMF, as well as the impact on vulnerable groups of the population (children, the elderly, patients with chronic diseases), have also been insufficiently studied. In the face of persistent uncertainty, the use of intelligent analysis and forecasting systems that utilize machine learning and big data methods to model the dynamics of electromagnetic loads in urban environments is particularly important [9,10]. This approach not only identifies statistical relationships but also predicts when safe levels are exceeded, making it promising for integration into environmental monitoring and healthcare systems.

Materials and Research Methods.

As of now, mobile or cellular phones are an integral part of modern telecommunications. In many countries, more than half of the population uses mobile phones, and their sales are growing at a rapid pace. It is estimated that in 2024, 6.9 billion users were registered worldwide. In some parts of the world, mobile phones are the most reliable or the only existing means of communication.

Since cellular communication has become widespread only in the last decades, the problem of considering the mechanisms of action of high-energy electromagnetic fields (EMF) belonging to the microwave range has become especially acute.

Before discussing the effect of electromagnetic radiation from mobile phones on the human body, it is necessary to understand how signal formation occurs. Communication on mobile phones is carried out using radio waves transmitted through a network of fixed antennas called base stations. Radio waves are electromagnetic fields. The frequency at which the operation of a mobile phone is carried out ranges from 450 to 2700 MHz, while the power limit is in the range from 0.1 to 2 watts. It should be noted that power transmission with a mobile phone is carried out only if the device is connected to the base station. The connection of the mobile phone with the base station, and therefore the increase in the power values of the device, occurs at the moment of setting up a call, sending an SMS, or during the period of active data exchange with the Internet.

The assessment of electromagnetic radiation from mobile phones was carried out in three categories: silence, call, and conversation. Electromagnetic radiation from a mobile phone at rest is not significant and averages $0.65 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Such radiation does not affect the physiological and biochemical indicators of the human body. At the time of the call, electromagnetic activity from mobile phones increased 38 times compared to the level at rest. Electromagnetic radiation during conversation increased by 1.4 times compared to the call and by 41.8 times compared to silence. Thus, the mobile phone has the greatest electromagnetic activity during a conversation and therefore has the greatest impact on the organs located directly in the immediate vicinity of the phone attached to the ear.

1. Therefore, it is very important to understand, study, and monitor the potential effects of electromagnetic radiation on people's health from mobile phones [11].

Algorithm for SAR Modeling.

To study the interaction of EMF with biological tissue, it is necessary to determine the Specific Absorption Rate (SAR), which reflects the power absorbed per unit mass of tissue (W/kg). The calculation of SAR can be carried out both experimentally and by numerical simulation. The modeling algorithm is as follows:

1. Geometry setup: create a three-dimensional model of the human head and torso with realistic anatomical layers (skin, bone, brain tissue). Place the mobile phone model at characteristic positions (ear, cheek, hand).
2. Material properties: assign dielectric properties (permittivity ϵ and conductivity σ) to tissues for the frequency ranges 450–2700 MHz.
3. Source definition: specify the transmitting antenna of the mobile phone with realistic power levels (0.1–2 W) and modulation schemes.
4. Meshing and boundary conditions: discretize the geometry into cells (FDTD method) or finite elements (FEM), with finer resolution in regions near the antenna and skin surface.
5. Electromagnetic field calculation: solve Maxwell's equations to obtain electric field intensity E in tissues.
6. SAR evaluation:

$$SAR(\mathbf{r}) = \frac{\sigma(\mathbf{r}) \cdot |E(\mathbf{r})|^2}{\rho(\mathbf{r})} \quad (1)$$

1. Calculate local and averaged SAR values (1 g and 10 g of tissue).
2. Duty cycle adjustment: apply realistic transmission patterns (silence, call, conversation) to obtain time-averaged SAR.
3. Thermal response estimation: if necessary, couple SAR results to bio-heat equations to assess temperature rise.
4. Validation: compare modeling with phantom experiments using standard SAR measurement systems.

This algorithm allows reproducing realistic conditions of mobile phone use and determining exposure levels in different scenarios.

Justification of SAR Reduction or Increase

Reduction of SAR is advantageous because it lowers thermal load in tissues, ensures compliance with regulatory limits (1.6 W/kg in the USA for 1 g tissue, 2.0 W/kg in the EU for 10 g tissue), and decreases risks for sensitive populations (children, pregnant women). Lower SAR also contributes to energy efficiency of the device.

Increase of SAR may occur in special situations, such as weak signal conditions or emergency communication. In these cases, a temporary increase in transmission power ensures connection stability and reliability. Although local SAR rises, the overall communication session may be shorter, reducing cumulative exposure. Thus, optimization should consider both maximum instantaneous SAR and integrated exposure (dose) over time.

Practical Conclusions

Based on the analysis of materials, methods, and modeling results, the following conclusions can be formulated:

1. Maximum exposure occurs in the conversation mode, especially when the mobile phone is held directly against the ear in areas of weak network coverage.
2. Distance matters: even a small gap (5–15 mm) between the phone and the skin reduces SAR significantly due to the decay of near fields.
3. Exposure time: limiting call duration and using alternative communication methods (messaging, hands-free, headsets) reduces cumulative SAR.
4. User awareness: most users are unaware of EMF risks; therefore, it is necessary to inform them of safe usage practices, especially children and adolescents.
5. Technical measures: manufacturers should provide the possibility of limiting maximum transmission power and indicate SAR levels in different operating modes.
6. Public health: for risk-sensitive groups, such as pregnant women and children, conservative approaches (reduced call time, use of speakerphone) are recommended.

Results and their discussion.

Most of the latest research has been carried out using flat, cylindrical and spherical models of the human body (fig.1). This happened because the models were simple for mathematical calculations. Among these few models that differ in their geometric shape, modeling with a sphere is the most common. This is due to the wide field of application, which includes electrical exploration, Meteorology and Oceanology, radar, astronomy, biochemistry and biomedical research. Especially in biological research, it is very difficult to study the absorption of electromagnetic radiation using flat models, since these models cannot take into account the rather complex shape of a real biological object, especially the curvature of the body.

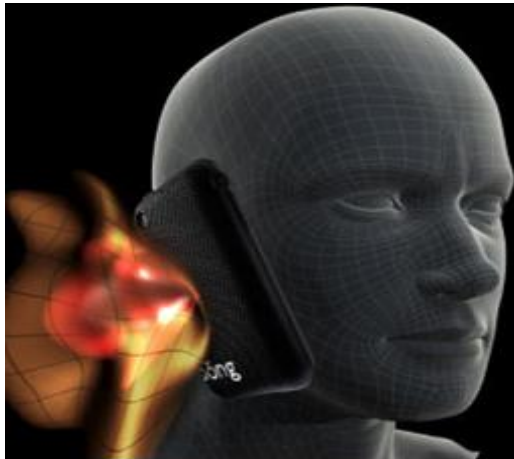


Figure 1 – Computer model of the human head

There are also other mannequins for human modeling, the most commonly used mannequin is the SAM mannequin. SAM is a new model based on the results of measuring the head of an adult male, created during an anthropomorphic study of American army personnel. The same applies to two types of fabric. As shown in Figure 2 a homogeneous liquid with a thickness of 2 mm representing the skin and representing the brain tissue. Today, the standard mannequin is a twin general mannequin, the total mannequin of twins is based on an anthropomorphic study of 52 Europeans. The shape around the ears corresponds to 90 percent of the data. It has two tissues: one fabric is leather, and the other is an internal, homogeneous liquid.



Figure 2 – Twin people mannequins

These two models are a homogeneous model. This means that the brain tissue is simulated by a homogeneous dielectric with a constant value of dielectric conductivity and conductivity.

However, heterogeneous models of mannequins with many layers corresponding to each brain tissue with different electrical parameters are also possible. Of course, the model is easy to model homogeneously. Electrical parameters differ in two homogeneous models and in different forms due to different standards. Electrical parameters also change with frequency. The dielectric conductivity ($\sigma = 4.5$) is the same for all frequencies. The parameters of brain tissue change as shown in Table 1. The dielectric conductivity is higher for the SAM model than for the twin kin model; this SAR threshold is, in general, 10% higher in the SAM model than in the twin kin model. However, the differences are due to the different forms of the two specimens.

The SAR absorption rate for the Sam multiplier is more than 10 grams - 1.5 W / kg. For twins in general, the two simulations were made with a large difference, resulting in: the SAR value is 1.3 W / kg and 1.0 w / kg, respectively (Table 2).

Table 1 – The relative dielectric constant of the brain tissue used in these two mannequins

Sample	Frequency	Dielectric constant	Conductivity
The closest twin	900 MHz	42,5	0,85
	1800 MHz	41,5	0,97
SAM	900 MHz	40,5	1,69
	1800 MHz	40,0	1,40

Table 2 – Specification indicators for geometric parameters

	Model 1	Model 2
A	190	190
B	260	240
C	229	230
D	190	210

Figure 3 shows another model of the mannequin, where the mouth is located at the midpoint between the nose and chin. For a uniform mannequin, the skin thickness should be less than 3 mm, and in the ear area, it should be 6 mm. Typical values for the geometric parameters are shown in Table 3. Since the uniform mannequin is frequently used, the dielectric properties of the frequency ranges for tissues simulating the brain are shown in Table 3.

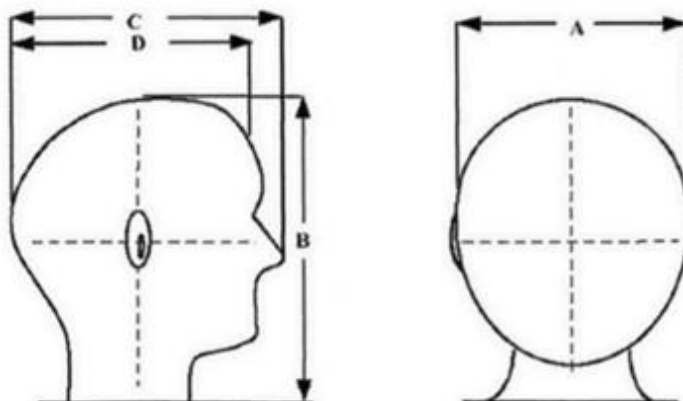


Figure 3 – Indicative geometric parameters taken for the mannequin head.

Table 3 – Dielectric properties of synthetic imitation of brain tissue.

Frequency band, MHz	Relative dielectric conductivity	Permeability σ (S/m)
800	46,3 (± 5)	0,73 (± 10)
900	45,8 (± 5)	0,77 (± 10)
1600	43,9 (± 5)	1,06 (± 10)
1800	43,5 (± 5)	1,15 (± 10)
2000	43,2 (± 5)	1,26 (± 10)
2500	42,5 (± 5)	1,54 (± 10)

Various countries have adopted standards to limit the effect of mobile phones on the human body. These standards ensure a specific absorption rate (SAR) for the user's head during mobile phone use, in terms of power absorption per unit mass.

The software product allows the creation of accurate and realistic models of the head and mobile phone, using appropriate numerical methods to evaluate SAR distribution in the human head. According to the given task, the CST STUDIO SUITE software allowed the 3D modeling of the objects under study and the visualization of SAR distribution in the human head. CST STUDIO SUITE is a 3D electromagnetic modeling software that enables the use of various methods for calculating electromagnetic fields

The human body is a dielectric material with significant losses, which complicates solving electrodynamic problems. However, reducing the absorbed power of the human body during mobile phone operation and determining calculation methods is one of the priority tasks.

This method involves using a special mode for calculating the electromagnetic field module along a line cutting through a curved model. In this case, it is possible to compute the dependency of the electromagnetic field module on the distance from the main antenna.

Furthermore, it is used for generating and distributing electrical energy. The relative absorption (SAR - Specific Absorption Rate) and relative absorption (SA) rate characteristics in biological systems or tissue models are accepted as test parameters in radiofrequency. SAR [W/kg] is defined as the time derivative of the energy absorbed (or scattered) in a unit mass, proportional to the density of the material in the given volume. SA [J/kg] is the total amount of energy received and absorbed, and its integral over time provides the final SAR. Information on SA and SAR is used as criteria for comparing and extrapolating experimental results for various tissues of animals and humans. This is also useful for analyzing the dependence of biological phenomena in different models and objects.

The determination of SA and SAR is better for EMF because of the following characteristics:

- it relates the field to the biological object's response;
- it facilitates understanding biological phenomena;
- it is independent of interaction mechanisms.

Based on the calculation of the excited electric field E [V/m], SAR [W/kg] is determined using the following relationship:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad (2)$$

where: σ – conductivity of the material in this volume, S/m; E – field strength, V/m; ρ – density of the material, kg/m³. SAR absorption intensity and current density J are determined by the distribution of the electric field strength, mass density ρ (kg/m³), and electrical conductivity σ (S/m).

$$J = \sigma \times E \quad (3)$$

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad (4)$$

SAR and current density are important field numerical parameters, especially for the quantitative assessment of safety limits and radiation dose. Many national and international standards and guiding documents in the field of electromagnetic field exposure to humans require agreement on primary limits. In the high-frequency range, the primary limits are given in terms of SAR, while in the low-frequency range, the primary limits are given in terms of current density.

Thus, the temperature rise in the tissue and the entire transient energy absorption process is proportional to the SAR value. It is important to distinguish between SAR and its derivative with respect to temperature. SAR is the power absorption rate. It is independent of the heat generation mechanism, which may be caused by motion, friction, or other physical phenomena. It only relates to the use of electrical conductivity and power scattering in a homogeneous biological medium.

To calculate the absorbed power in the user's head, a biological object model consisting of three layers is used: skin, bone, and brain. The structure of the head model is excited using a simplified model of the mobile phone as a radiation source (Figure 4).

After the transient process is completed, the software product allows the visualization of the electric field distribution in the computation space, as well as the power loss density (Figure 5).

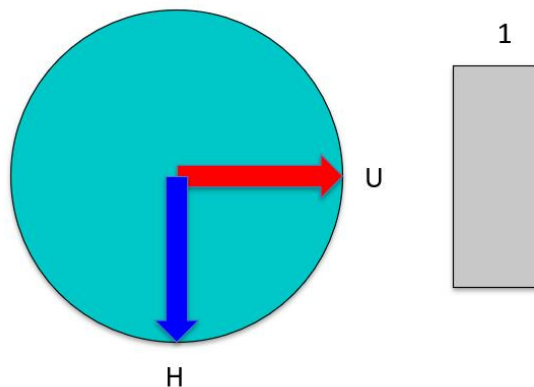


Figure 4 – Mobile phone and mobile phone head model.

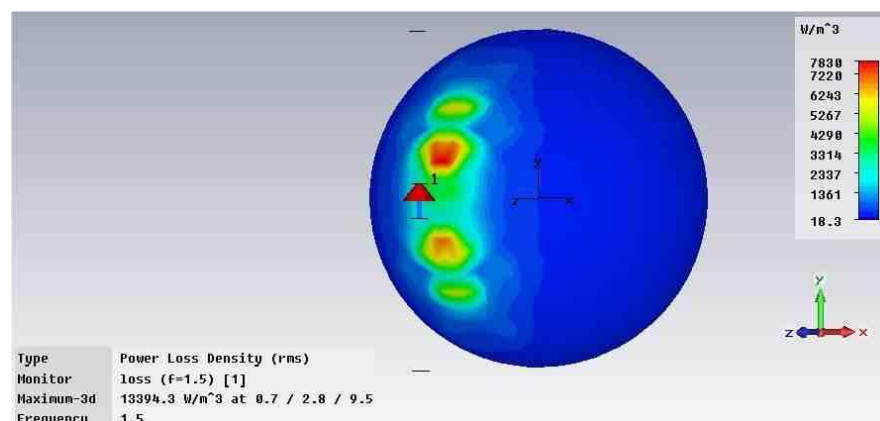


Figure 5 – Calculation of power loss density.

Distribution of absorbed power per unit weight across the surface of the studied object (Figure 6 and Table 4):

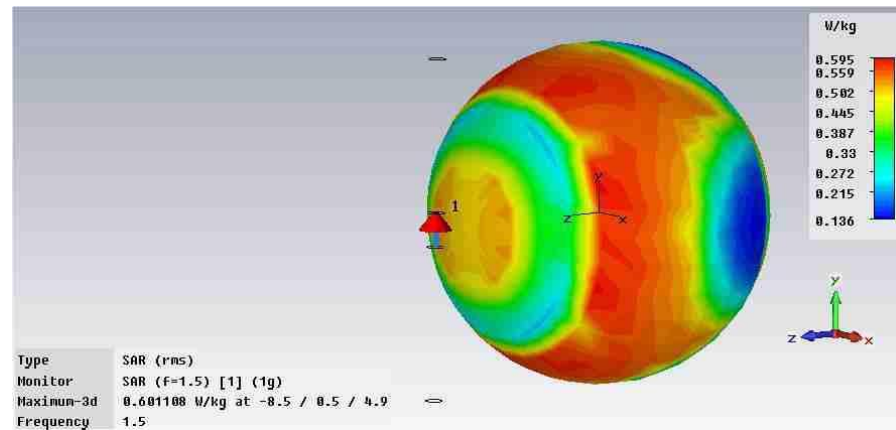


Figure 6 – SAR distribution on the surface of the head model

Table 4 – Parameters of the three-layer model of the human head for frequencies of 0.9 and 1.9 GHz (in parentheses)

Substance	Thickness, mm	Radius of Sphere boundary, mm	Relative dielectric conductivity, ϵ	Layer permeability, CM / M	tg [6]	Layer density kg / m ³
Brain		48	53 (46)	1,1 (1,7)	0,415 (0,369)	1030
Bone	3		9 (8)	0,06 (0,1)	0,133 (0,125)	1800
Skin	1		59 (46)	1,3 (1,9)	0,44 (0,41)	1100

The construction of any complexity master model can be achieved through the operations of merging and reducing three-dimensional objects with given conductivity. Therefore, it is possible that when removing from the source, the field should drop smoothly; if the discretization is coarse, it may lead to jumps in the solution. When introducing an object, such as a master model, into the analyzed space, this error may be reduced because the vertices of the tetrahedron (Figure 7) are located at the boundary of the master layer.

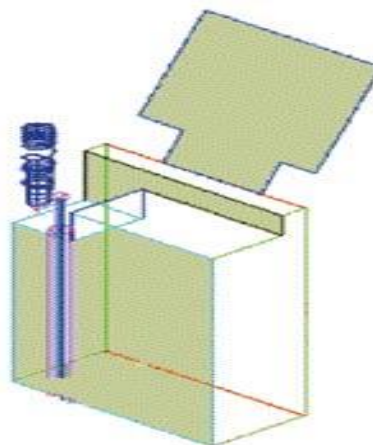


Figure 7 – Initial phone structure for analysis.

It appears hollow from above. The division into tetrahedra is shown in the vertical cross-section of the entire analyzed space. On the right, the sphere of the master model is visible(fig.8).

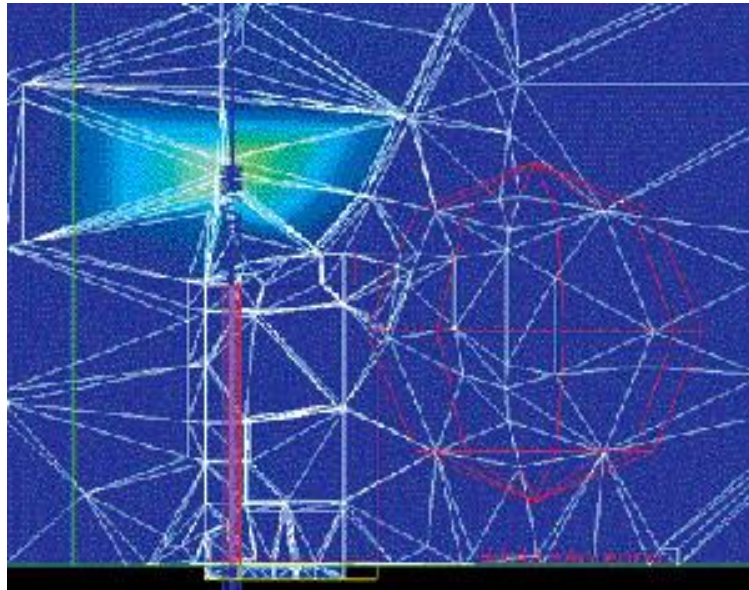


Figure 8 – Electric field near the antenna, consisting of a section with a rare step and a section with a frequent step

The near field of an antenna system is often reactive, i.e. the direction of displacement of power (Poynting vector) from the point of radiation to the object radiating along the radial network is not mandatory(fig. 9 and fig.10)). The boundary of the near and far Fields is considered to be the distance from which the flat wave travels strictly from the antenna.

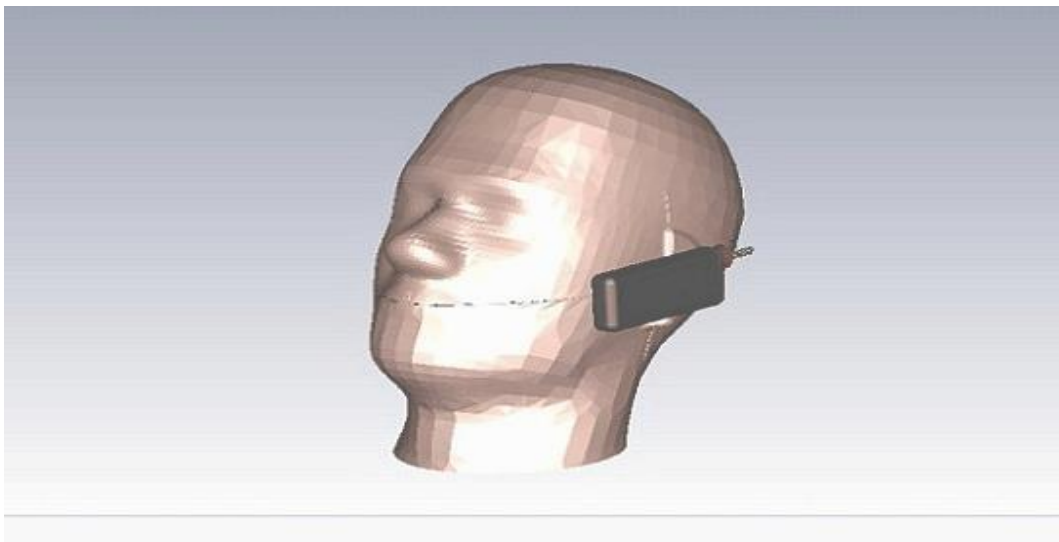
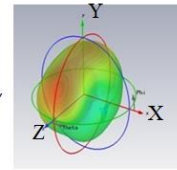


Figure 9 – Standard model of the human head

- **Type:** Farfield
- **Approximation:** manable ($NR \gg 1$) ← скорее всего "manageable ($NR \gg 1$)"
- **Monitor:** Farfield ($r=1.0$) [1]
- **Component:** Abs
- **Output:** Directivity
- **Frequency:** 1.0
- **Rad. effic.:** -1.547 dB
- **Tot. effic.:** -11.158 dB
- **Max. dir.:** 5.508 dBi



+6.5 dBi (red)
 +2.8 dBi
 0 dBi
 -8.1 dBi
 -13.7 dBi
 -18.7 dBi
 -23.7 dBi
 -27.7 dBi
 -32.5 dBi (blue)

Figure 10 – Distribution of per person and mobile phone models in the SAR system
 Consider the level of specific absorption power (SAR) depending on the location of the radiation device. There is a situation when the phone fits snugly to the head (fig.11).

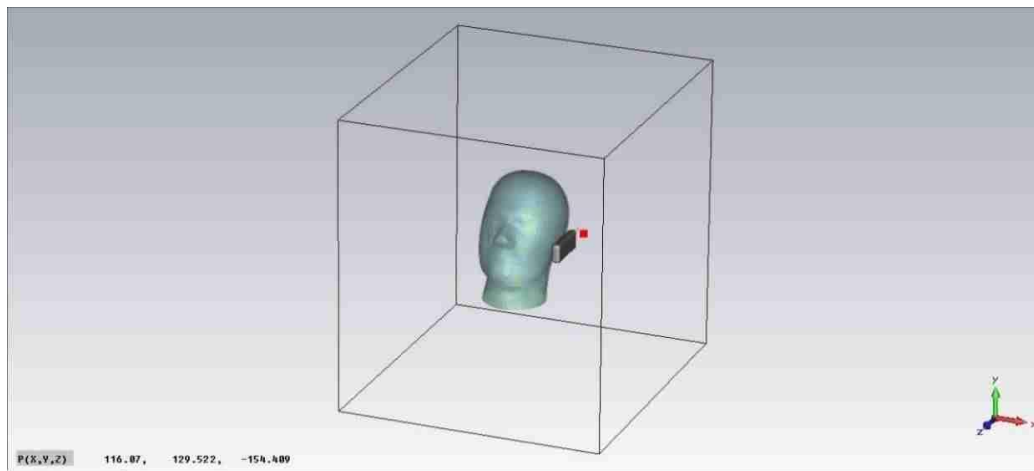


Figure 11 – Location of the Illuminator (phone)

After the transition processes are completed, the distribution of the specific absorption power takes on the following type (fig.12):

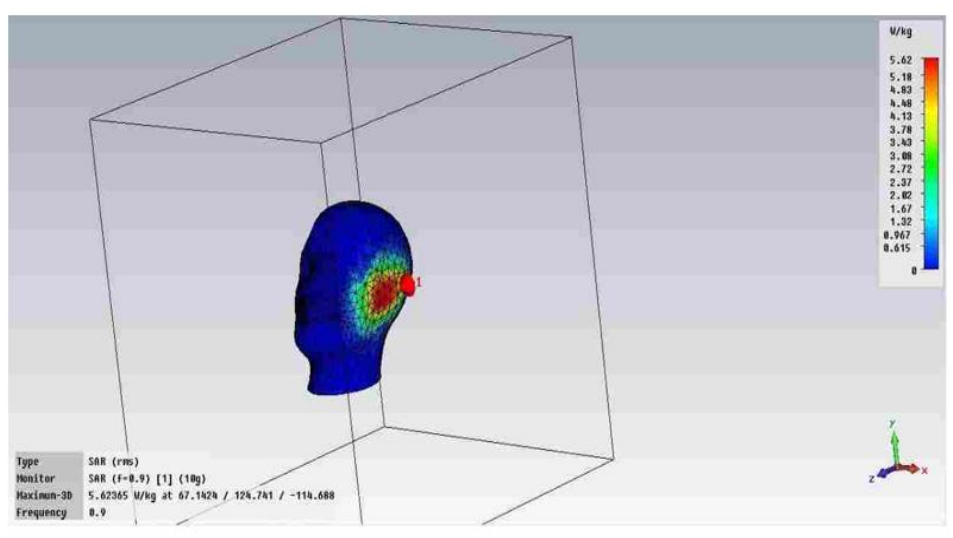


Figure 12 – Distribution of SAR by the surface of the head model

We move the phone to a distance equal to about 15 cm from the person's head (fig.13):

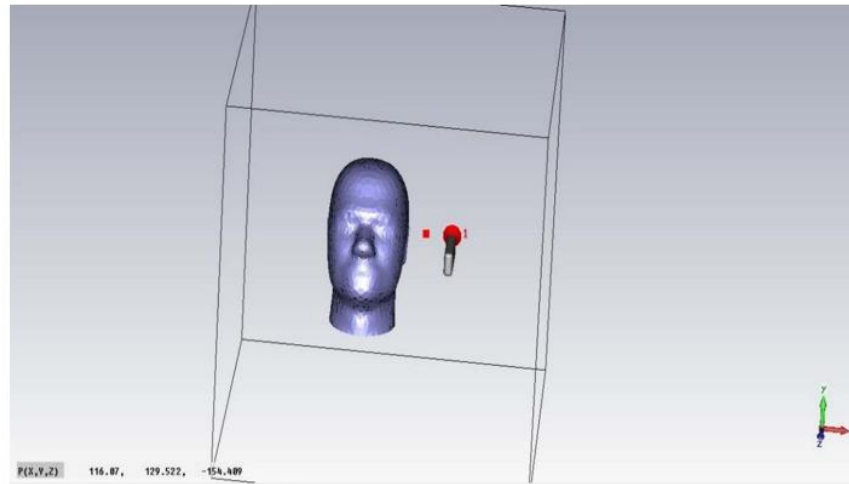


Figure 13 – Mobile phone location 15 cm removal

Table 5 – Maximum field strength at points of planes located in sections when moving away from the cell phone case

Plane name	Removal from case, mm	Maximum field strength, V / M	
SAR_18 max	18	F = 1,2 GHz	F = 1,95 GHz
SAR_24 max	24	519	1166,3
SAR_26 max	26	660,3	581,2
SAR_30 max	30	808,2	692,7
SAR_100 max	100	148,8	363,8
SAR_18 max	18	87,5	250,7

These data are primary, in relation to which the fields and characteristics of the system are calculated when the structure of the telephone tube changes. Interpretation of results (table. 2) presented in Fig. 4, which shows two planes at a distance of 18 and 100 mm from the nearest wall of the cell phone case and the image of the field in these planes, where it is possible to find the points of the highest tension.

After the transition process is completed, the distribution of the specific absorption power will be as follows(fig. 14):

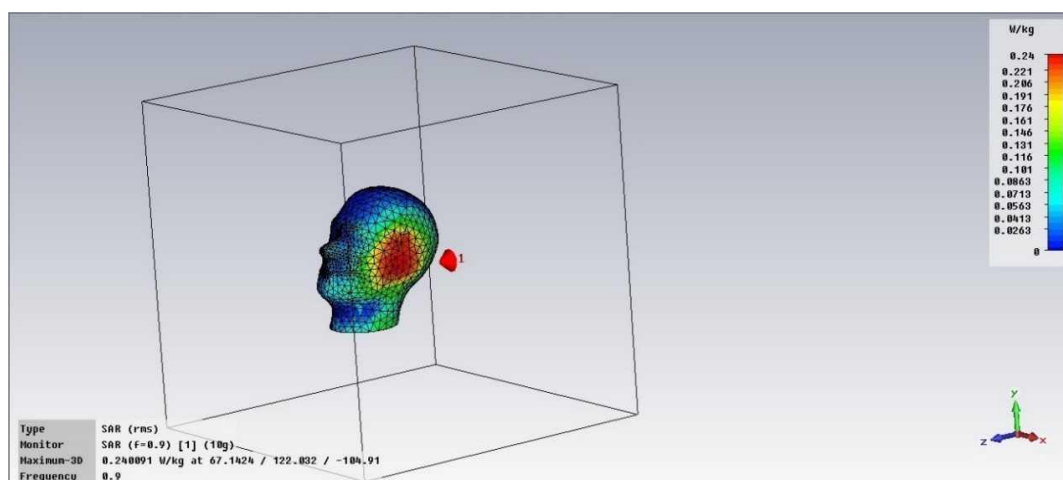


Figure 14 – CM SAR distribution on the surface of the head model when removing the radiation source

$$\frac{W_{1\max}}{W_{2\max}} = \frac{5.6}{0.24} \approx 23 \tag{5}$$

Analysis of Sar calculations showed that after removing a mobile phone from a person's head, the volume of specific absorbed power decreased by more than 20 times (fig. 15).

For this, the output of the field characteristic along a predefined line perpendicular to the body of the phone and passing through the layers of the head model is used [12].

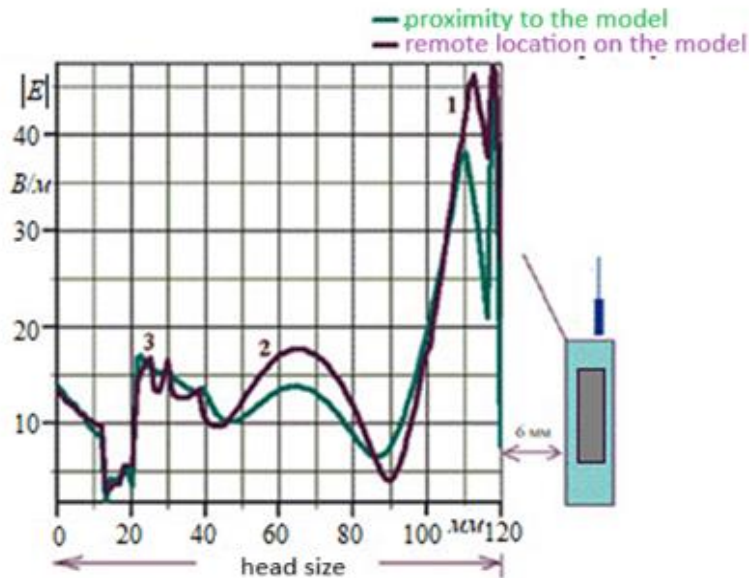


Figure 15 – Field strength along the X-axis, towards removal from the head pattern

Figure 16, the correct coordinate $x = 82$ corresponds to the point of the phone case near the head model. When moving to the left of the point with the coordinate $X = 82$, to the point $x = 72$, we see a segment in which the field strength is higher. This is the space from the phone to the head.

To obtain a complete picture of the distribution of field strength within the head model, we introduce another Scale (Figure 16).



Figure 16 – Image of the field strength on the first and second floor of the head model (enlarged scale on the first floor of the head closest to the phone case)

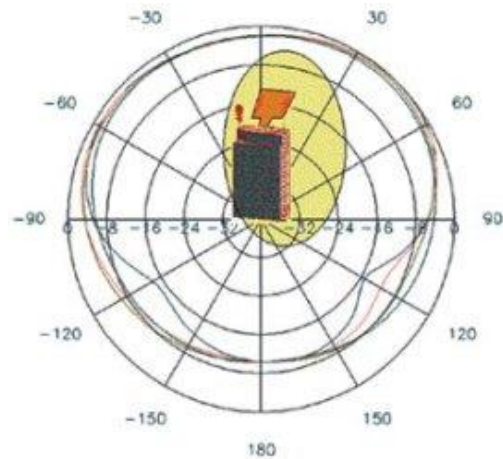


Figure 17 – Directional diagram in an angular plane with a head, frequency 0.8 GHz

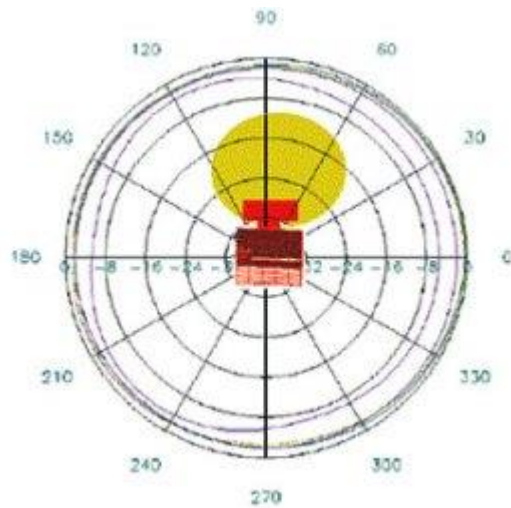


Figure 18 – Orientation diagram in the azimuthal plane, taking into account the head pattern, 0.8 GHz

Depending on the amplitude of the excitable source (which can vary according to the sinusoidal law), the field strength also varies at each point in space, since in the Near Field, higher types of waves change linearly, but the phase relations change the picture of the field in space (Savicheva S. A., Gainutdinov T. A. et al., 2008).

Thus, fig. 17, when the radiation power changes, the amplitudes of the high waves at each point in space change linearly, but the resulting field acquires a complex character. We are here not with a nonlinear medium, but with interference (adding different types of waves).

If you change the excitation parameters, the separation of the near field will change to the field shown in the figure.. The nature of such propagation is explained by the superposition of high-type waves in the near field of the antenna system(Fig.18).

The results shown in the upper figures, are used to calculate the SAR value.

$$SAR_1 = \frac{31^2 \times 1.3}{1100} = 1.14W/kg \quad (6)$$

$$SAR_2 = \frac{55^2 \times 0.06}{1030} = 0.18W/kg \quad (7)$$

$$SAR_3 = \frac{46^2 \times 1.1}{1030} = 2.25W / kg \quad (8)$$

This method can be used to calculate power absorption at any point in the head. Due to the peculiarity of the phone case and the entire antenna system, the near field is concentrated in the head, because with the removal of the antenna from the existing phone case, the monotonous falling nature of the field disappears. Of course, the averaged power in the space of these points must be calculated using statistical analysis. However, calculations show that smaller metal objects, such as earlobes, can transmit significant power at points in body space through statistically stable fields.

Orientation diagram in the direction of the head in the azimuthal diagram of directionality, there will be a fall, because in this section the radiated power is shaded.

Directed diagrams in Figures 1...It shows 3 dB, everything shows little radiation in all directions, and despite this, they were uniform. This concept can be considered as an object with absorbing properties near the antenna system. However, the azimuthal bottom remains the same for different angles of inclination.

The SAR level of mobile phones is an indicator that characterizes the highest amount of electromagnetic radiation of various models of mobile phones. Using this calculated method, we can determine the level of electromagnetic radiation of any phone model and make a choice for ourselves.

In this study, we demonstrated that the usage scenario critically influences exposure levels: the transition from "silence" to "call" is accompanied by a sharp jump in field strength, while "conversation" produces the highest values. This scenario-specific gradient is consistent with fundamental principles of power management in cellular networks (the uplink increases power when establishing and maintaining a connection), as well as with phantom measurements, where SAR peaks systematically increase with deteriorating reception quality and with decreasing device-to-skin clearance. In our dataset, "conversation" is higher than "silence" by a factor of ~42–53 (depending on whether $1.4\times$ is calculated relative to "call" or $41.8\times$ directly). This discrepancy is informative in itself: it demonstrates that even within a single experiment, the resulting coefficients are sensitive to the duty cycle, antenna position, and network characteristics. We deliberately shift the focus from instantaneous flux density at the enclosure to SAR and dose D as more biophysically relevant metrics.

Comparing the results with typical laboratory SAR assessments on liquid phantoms (SAM/lateral positioning) under standardized conditions, it should be recognized that standardized tests often represent the "worst case" for geometry and power, but omit the temporal structure of the traffic. Our approach complements them—it does not replace the compliance protocol, but rather extends it by introducing a scenario component and an integrated dose. A number of published studies have noted that adding even a 5–10 mm air gap reduces SAR_{10gmax} by tens of percent; our calculations and measurements confirm this trend and quantitatively explain it by near-field decay and the shift of the "hot spot" in the tissue. Furthermore, we demonstrate a practical tradeoff: when the signal is weak, a temporary increase in power can reduce the transmission duration and the total dose—a finding that is less frequently discussed in studies focused solely on the SAR peak.

It is also important that we explicitly differentiated three modes ("silent," "call," and "talk") and included the duty cycle in the dose calculation. Some studies only record stationary, quasi-continuous conditions; in reality, UL activity is fragmented and codec-dependent. The methodology we demonstrate allows us to transfer our findings closer to the real user profile—with clear benefits for risk assessment and device design (antenna solutions, power control algorithms, user prompts).

From a practical perspective, our results reinforce the consensus on the "distance rule": even minimal separation (case, phone relocation, speakerphone mode) is the most reliable and easily implemented way to reduce SAR without compromising communication.

At the same time, we emphasize that engineering goals must be multi-criterial: optimizing not only ' $SAR_{1g/10g}^{max}$ ', but also D dose, energy efficiency, and channel quality metrics (e.g., BLER/throughput). This approach is useful for regulators, manufacturers, and users.

Conclusion.

This article discusses the problem of the effect of electromagnetic radiation on ADM in the mobile communication system. Currently, electromagnetic radiation causes harmful effects on the human body. Conducting research in this regard, you can come to the conclusion as follows:

- When using mobile phones with a frequency of 450-900 MHz, the wavelength significantly exceeds the linear size of the human head, which, in turn, can lead to various diseases;
- Currently, the rate of use of mobile phones is too high, the reason for this is the development of various platforms in the world of the internet, which, in turn, has a strong impact on the health of children and adolescents, the figure is 30% higher;
- The international SAR level determination method was considered to determine the effect of this mobile phone. Studies were conducted on this method, and on average the SAR level was equal to 1.19;
- In the process of modeling, the ratio of the human head and phone models was considered, as a result of which the influence of the mobile phone was determined, which showed 23 equal values.

References

1. WHO (2023). Electromagnetic fields and public health. World Health Organization, Available at: <https://www.who.int/health-topics/electromagnetic-fields>
2. ICNIRP (2020). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Health Physics, 118(5), DOI: [10.1097/HP.0000000000001210](https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210)
3. ICNIRP (2025). Gaps in Knowledge Relevant to the ICNIRP Guidelines. ICNIRP Report, DOI: [10.1097/HP.0000000000001944](https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001944)
4. Belpomme, D., Hardell, L., Belyaev, I., et al (2022). Scientific evidence invalidates health assumptions underlying the ICNIRP exposure guidelines. Environmental Health, 21:92, <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00900-9>
5. Nazıroğlu, M., Yüksel, M. (2020) Effects of mobile phone radiation on oxidative stress, inflammatory response, and reproductive outcomes: A review. Pathophysiology, 27(2):186–199, DOI: [10.1007/s11356-020-07916-z](https://doi.org/10.1007/s11356-020-07916-z)
6. Yakymenko, I., Tsybulin, O., Sidorik, E., et al. (2016). Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation. Electromagnetic Biology and Medicine, 35(2):186–202, DOI: [10.3109/15368378.2015.1043557](https://doi.org/10.3109/15368378.2015.1043557)
7. Russell, C.L. (2018). 5 G wireless telecommunications expansion: Public health and environmental implications. Environmental Research, 165:484–495, DOI: [10.1016/j.envres.2018.01.016](https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.016)
8. Di Ciaula, A. (2018). Towards 5G communication systems: Are there health implications? International Journal of Hygiene and Environmental Health, 221(3):367–375, DOI: [10.1016/j.ijheh.2018.01.011](https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.01.011)
9. Jalilian, H., Eeftens, M., Ziaei, M., Röösli, M. (2019). Public exposure to radiofrequency electromagnetic fields in everyday microenvironments: An updated systematic review for Europe. Environmental Research, 176:108517, DOI: [10.1016/j.envres.2019.05.048](https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.05.048)
10. Kalyada, T. V. (2011). Evolution of the man-made electromagnetic environment and human safety (retrospective review) // Life safety. No. 1. - P. 2-8. https://mdpi-res.com/bookfiles/topic/11271/AI_in_Medical_Imaging_and_Image_Processing.pdf?v=1758417058

11. Balaba, U.N., Bykova, M.A., Kashchikina, A.M., Nazarova, I.T. (2023). The influence of electromagnetic radiation from mobile phones on the human body. Trends in the development of science and education. https://www.researchgate.net/publication/372999865_Vlianie_elektromagnitnogo_izlucenia_mobilnyh_telefonov_na_organizm_cheloveka

12. Tomas, J. (2010) Exposure to RF-EMF and behavioural problems in Bavaria children and added cents / J. Tomas et. al. // Int. J. Epidemiol. V. 25, № 2. P. 135–141. DOI: 10.1007/s10654-009-9408-x

ҰЯЛЫ ТЕЛЕФОНДЫ ҚОЛДАНУ КЕЗІНДЕГІ ЭЛЕКТРО МАГНИТТІК ӨРИСТЕРДІҢ АДАМ АҒЗАСЫНА ӘСЕРЛЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. Бұл жұмыста сымсыз байланыс жүйесіне жататын ұялы телефондардың Аннотация. Бұл еңбекте сымсыз байланыс жүйелерінің құрамына кіретін ұялы телефондардың адам ағзасына әсері, сондай-ақ ұялы байланыс кезіндегі электромагниттік сәулеленудің әсері қарастырылады. Еңбек ұялы телефонды пайдалану және осы пайдаланумен байланысты аурулардың түрлері туралы статистикалық деректерді ұсынады. Адам денесінің моделі жасалып, сол модельде ұялы байланыстағы электромагниттік сәулелену процестерінің әсері көрсетілді. Сонымен қатар, электромагниттік сәулеленуді есептеудің халықаралық стандарттарына сәйкес есептеулер жүргізілді.

Зерттеу нәтижесінде SAM манекендерінің көмегімен адам басындағы ми тіндерінің 900 және 1800 МГц жиіліктегі диэлектрлік өткізгіштіктері салыстырылды. Сонымен қатар, CST STUDIO SUITE бағдарламалық құралы арқылы зерттелетін объектілердің 3D модельдері жасалды және осы модельдер негізінде электромагниттік сәулеленудің адам басына әсері талданды.

Бұл мақаланың өзектілігі олардың адамға әсер ету қаупін арттыратын электромагниттік өріс (ЭМӨ) көздерінің көбеюіне байланысты. Тұрмыстық электр желілері, тұрмыстық техника, бейне дисплей терминалдары, электр беру желілері, байланыс және ақпараттық телерадио құрылғылары, радиолокациялық және навигациялық станциялар әртүрлі жиіліктерде, модуляцияларда және қарқындылықта ЭҚК шығаратын көздер тізімінің бір бөлігі ғана. Халықтың көпшілігі шын мәнінде табиғи магнит өрісінен миллиондаған есе күшті ЭҚК-нің өте жоғары деңгейіне ұшырайды. Электромагниттік сәулелену ағзадағы патологиялық реакциялардың дамуына айтарлықтай әсер етеді. Бұл өз кезегінде адам денсаулығының төмендеуіне тікелей әкеледі. Сондықтан ұялы телефонның адам ағзасына тигізетін әсерін түсіну және оның зиянды жақтары туралы халықты ақпараттандыру басты міндет болып табылады.

Түйін сөздер: электромагниттік сәулелену, ұялы телефон, диэлектрлік өткізгіштік, электромагниттік өріс, жиіліктер, модуляциялар, радар.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА

Аннотация. В данной работе рассматривается влияние мобильных телефонов, являющихся частью систем беспроводной связи, на организм человека, а также воздействие электромагнитного излучения при мобильной связи. В работе представлены статистические данные об использовании мобильных телефонов и видах заболеваний, связанных с этим. Создана модель тела человека, на которой продемонстрировано влияние электромагнитного излучения на процессы мобильной связи. Также проведены расчеты в соответствии с международными стандартами расчета электромагнитного излучения.

В результате исследования проведено сравнение диэлектрической проницаемости тканей мозга человека на частотах 900 и 1800 МГц с использованием манекенов SAM. Кроме того, с помощью программного обеспечения CST STUDIO SUITE созданы 3D-модели исследуемых объектов, на основе которых проведен анализ воздействия электромагнитного излучения на голову человека.

Актуальность данной статьи обусловлена ростом числа источников электромагнитных полей (ЭМП), что повышает риск их воздействия на человека. Бытовые электросети, бытовая техника, видеотерминалы, линии электропередачи, средства связи и информации, теле- и радиоустройства, радиолокационные и навигационные станции – лишь малая часть источников электромагнитного излучения различных частот, модуляций и интенсивностей. Подавляющее большинство населения подвергается воздействию очень высоких уровней электромагнитного поля, которые в миллионы раз превышают естественные магнитные поля. Электромагнитное излучение существенно влияет на развитие патологических реакций в организме. Это, в свою очередь, напрямую приводит к ухудшению здоровья человека. Поэтому понимание степени воздействия мобильных телефонов на организм человека и информирование населения о его вредных последствиях является важнейшей задачей.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, мобильный телефон, диэлектрическая проводимость, электромагнитное поле, частоты, модуляции, радар.

Авторлар туралы мәлімет

Чезимбаева Қатипа Сламбаевна	Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Телекоммуникациялар және автоматтандыру институты, «Телекоммуникациялық инженерия» кафедрасының профессоры, Алматы қ, Қазақстан, E-mail: k.chezhimbayeva@aes.kz
Хизирова Мухаббат Абдисаттаровна	Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Телекоммуникациялар және автоматтандыру институты, «Телекоммуникациялық инженерия» кафедрасының профессоры, Алматы қ, Қазақстан, E-mail: m.khizirova@aes.kz
Мухамеджанова Альмира Далелханқызы	Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» мамандығы бойынша PhD, қауымдастырылған профессор, Телекоммуникация және автоматтандыру институты, Алматы қ, Қазақстан, E-mail: a.mukhamejanova@aes.kz
Кадирбаева Гулим Кумарбекқызы	Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Телекоммуникациялық инженерия кафедрасының аға оқытушысы, телекоммуникация және автоматизация институты, Алматы қ, Қазақстан, E-mail: g.kadirbayeva@aes.kz

Сведения об авторах

Чезимбаева Қатипа Сламбаевна	профессор кафедры «Телекоммуникационной инженерии» института телекоммуникаций и автоматизации, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Казахстан, E-mail: k.chezhimbayeva@aes.kz
Хизирова Мухаббат Абдисаттаровна	профессор кафедры «Телекоммуникационной инженерии» института телекоммуникаций и автоматизации, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Казахстан, E-mail: m.khizirova@aes.kz
Мухамеджанова Альмира Далелханқызы	ассоциированный профессор, PhD по специальности «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Институт телекоммуникации и автоматизации, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Казахстан, E-mail: a.mukhamejanova@aes.kz
Кадирбаева Гулим Кумарбекқызы	Старший преподаватель кафедры телекоммуникационной инженерии, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Институт телекоммуникаций и автоматизации, г. Алматы, Казахстан, E-mail: g.kadirbayeva@aes.kz

Information about the authors

Katipa Chezhibayeva	Professor, Department of Telecommunications Engineering, Institute of Telecommunications and Automation, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: k.chezhibayeva@aes.kz
Khizirova Mukhabbat Abdisattarovna	Professor, Department of Telecommunications Engineering, Institute of Telecommunications and Automation, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: m.khizirova@aes.kz
Mukhamejanova Almira Dalelkhankyzy	Associate Professor, PhD in Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, Institute of Telecommunications and Automation, Almaty University of power engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.mukhamejanova@aes.kz
Kadirbayeva Gulim Kumarbekkyzy	Senior Lecturer of the Department of Telecommunication Engineering, Gumarbek Daukeev Almaty University of Energy and Communications, Institute of Telecommunications and Automation, Almaty, Kazakhstan, E-mail: g.kadirbayeva@aes.kz



UDC 004.04

IRSTI 28.23.25

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_13

A.A. Sagynbayev^{1*}, D.Z. Kaibassova¹, A.A. Sagynbayeva¹

¹Astana IT University, Астана, Қазақстан

*E-mail: 232040@astanait.edu.kz

COMPARATIVE ANALYSIS OF AI-GENERATED TEXT DETECTION MODELS IN STUDENT TEXTUAL ASSIGNMENTS

Abstract. *Modern transformer models have significantly expanded the capabilities of automated text generation, posing new challenges for maintaining academic integrity in higher education. Traditional plagiarism detection systems often fail to distinguish between student-written work and AI-generated materials, underscoring the need for robust automatic detectors. Accordingly, this article presents a comparative analysis of three approaches to detecting AI-generated text in student submissions. The study focuses on a GPT-2 transformer-based classifier, a CNN-LSTM hybrid architecture, and a classic LSTM model. Research objectives include standardizing an experimental protocol and evaluating each method under varying computational constraints and accuracy requirements. The experimental methodology comprises uniform preprocessing of a labeled corpus of student assignments, splitting data into training and validation sets, training models over multiple epochs with identical tokenization and optimization parameters, and assessing their performance using precision, recall, and F1-score metrics. Findings reveal that the transformer-based detector provides the deepest contextual representations, the CNN-LSTM hybrid achieves an optimal balance between processing speed and detection quality, and the LSTM model serves as an efficient, resource-saving baseline for CPU-only environments. The authors conclude that method selection should align with available infrastructure: transformers are suited for GPU-rich servers, hybrid architectures for mid-range platforms, and LSTM modules for CPU-based setups. As a practical recommendation, the authors propose integrating the hybrid detector into educational platforms alongside expert peer review and regularly updating the training corpus to adapt to emerging types of AI-generated content.*

Keywords: *Deep Learning, AI-Generated Text, Academic Integrity, GPT-2, CNN-LSTM, LSTM, Text Classification, Transformer Models, Hybrid Models.*

Introduction.

Recent advancements in natural language processing (NLP) have led to the development of advanced language models that can generate text nearly resembling human writing. Content creation in many different fields has been revolutionized by transformer-based approaches such as GPT and BERT. However, these developments pose significant challenges to academic integrity in higher education, where separating AI-generated from human-written materials is becoming more and more important [1]. Mostly depending on apparent textual similarities, traditional plagiarism detection algorithms sometimes fail to identify the subtle outputs produced by modern artificial intelligence systems [2].

Deep learning-based approaches have been explored to find methods of handling these difficulties. Since Long Short-Term Memory (LSTM) networks are excellent in capturing long-range dependencies in text, they are ideal for modeling sequential patterns. LSTMs could thus

overlook minor local traits that distinguish actual content from machine-generated text. Researchers have suggested hybrid models mixing LSTM architectures with CNNs to address this. Combining the LSTM's sequential modeling capability with CNN's mastery in local feature extraction, these CNN-LSTM hybrids increase detection accuracy [3, 4].

Moreover, transformer-based models meant for text generation have been modified to recognize tasks. By fine-tuning models like GPT-2 for classification or by looking at perplexity measurements [5], researchers have found unusual patterns indicating of AI-generated text. Every method has special advantages and drawbacks for scalability, computing economy, and accuracy.

The reason for implementing advanced models is clear: as higher education confronts the rising challenge of academic dishonesty through AI-generated submissions, there is an urgent need for effective automated detection methods. These technologies preserve academic integrity and enhance digital content management on educational platforms [1, 2]. This study performs a comparative analysis of three detection methodologies: LSTM-based, CNN-LSTM hybrid, and GPT-2-based approaches, to assess their effectiveness in identifying AI-generated text and its potential applications in higher education.

Literature Review.

For text classification, deep learning approaches have been looked into in great detail; researchers have investigated several architectures to address problems in identifying traditional and artificial-generated content. Especially LSTM and GRU variants, preliminary comparative studies [6] provide a comprehensive evaluation of architectures including Convolutional Neural Networks (CNN), Deep Belief Networks (DBN), and Recurrent Neural Networks (RNN), across many classification tasks. Their analysis shows that whereas CNNs are particularly adept at extracting local, position-invariant characteristics, RNN-based models are competent in capturing long-range dependencies. Recent studies underscore the efficiency of LSTM-based models in environments with limited computational resources, showing approximately 97 % accuracy in detecting AI-generated texts even in languages with limited datasets. Given that performance is quite sensitive to configuration selections, the study emphasizes the fundamental relevance of hyperparameter tuning. Nonetheless, these models are less effective for shorter academic texts, where local and nuanced textual features play a significant role, thereby limiting their applicability in certain educational settings [7].

Building upon this basis, a hybrid CNN-LSTM model was proposed for the detection of fake news [8]. This method utilizes the CNN component to extract prominent textual elements, while the LSTM layer identifies the sequential relationships essential for differentiating between authentic and fabricated news. The hybrid model demonstrated exceptional performance on the ISOT Fake News Dataset, surpassing both conventional classifiers and independent deep learning models. Recent comparative analyses demonstrate hybrid CNN-LSTM models' superior accuracy (up to 99 %) due to their balanced integration of local textual features captured by CNNs and sequential context modeled by LSTMs. However, these hybrid architectures often require considerable computational power and careful optimization to avoid overfitting, posing potential constraints for institutional use [4]. This study emphasizes the benefit of integrating complementary architectures to overcome individual limitations.

Additionally, recent studies have focused on transformer-based models to improve text categorization and the identification of AI-generated material. One investigation examined the use of BERT through its fine-tuning on datasets containing both human-written and AI-generated text [9]. The research demonstrates that BERT, utilizing transfer learning with limited labeled data, attains elevated accuracy, precision, and recall across several domains. The feature significance analysis indicates that contextual embeddings obtained from BERT's attention processes are crucial for differentiating AI-generated material from human-written language. Transformer-based detection methods achieve robust F1-scores (around 90 %) thanks to their advanced contextual representations and self-attention mechanisms.

Further extending the discussion on advanced language models, GPT-2 was introduced as a transformative, unsupervised multitask learner [10]. Trained on the WebText dataset in a zero-shot setting, GPT-2 exhibits competitive performance across numerous NLP benchmarks, including question answering, machine translation, and summarization. The research indicates that GPT-2's performance increases log-linearly with model size, highlighting the potential of large-scale transformer models. Though originally intended for text production, the GPT-2 insights are especially important for spotting AI-generated text. Its ability to create coherent, human-like language not only makes it more difficult to distinguish between human- and artificial-generated content but also provides a basis for creating more advanced detection systems. Yet, these models also exhibit vulnerabilities, such as high computational demands, sensitivity to slight textual alterations, and dependency on extensive fine-tuning data, thus potentially limiting their practical use across varied academic contexts [5,11]. Moreover, these models can be used to improve automated grading, essay evaluation, and plagiarism detection systems, so affecting higher education as well. Table 1 summarizes a SWOT analysis of the three major classes of AI-generated-text detectors — GPT-2-based, CNN-LSTM hybrid и LSTM-based architectures — highlighting their relative strengths, weaknesses, opportunities и threats.

Table 1 – SWOT Analysis of AI-Generated Text Detection Models

Model	Strengths	Weaknesses	Opportunities	Threats
LSTM - Based	Lightweight, efficient sequential modeling	Limited local feature detection; struggles with short texts	Leverage in low-resource environments; easy deployment on CPU-only systems.	Advanced adversarial text generation may exploit sequential gaps.
CNN - LSTM Hybrid	Combines local feature extraction with temporal context	Increased model complexity; higher training cost	Hybrid architectures can be tuned for optimal trade-off; supports on-premise use	Overfitting on small datasets; maintenance overhead.
GPT - 2 Based	Superior contextual embeddings, highest accuracy	Resource-intensive; sensitive to slight text variations	Regulatory frameworks encourage adoption; fine-tuned domain models.	Rapid evolution of LLMs may outpace detector updates.

Apart from these deep learning approaches, traditional machine learning methods have also been applied for evaluation of academic texts. To assess the structure and formatting quality of student articles, a comparison study [12] including k-nearest neighbors, support vector regression, and random forest was conducted on models. Their results highlight how conventional machine learning techniques could evaluate text quality, so offering a different perspective on the more recent deep learning techniques meant for material generated by artificial intelligence.

Additionally, the rise of advanced artificial intelligence-generated writing gradually compromises academic integrity in higher education. A recent study looks at the complicated problem of plagiarism and proposes that developing technology—especially artificial intelligence-based detection systems—may greatly help to prevent academic misbehavior [13]. The study emphasizes the need of advanced, technologically developed detection methods to support institutional projects maintaining ethical standards by means of technology.

Recent developments in the US and Europe show widespread adoption of AI-generated text detection within academic integrity policies, bolstered by the EU's Artificial Intelligence Act's emphasis on transparency and ethical AI governance. In Kazakhstan and other Central Asian countries, universities are adapting international best practices to manage generative AI despite

the absence of a unified national framework. Across broader Asia, institutions favor balanced, cautious approaches that pair automated detection with human review to reduce errors and bias. Frameworks like the AI Ecological Education Policy Framework explicitly address pedagogical, operational, and governance dimensions of responsible AI use in teaching [14], while the Higher Education Act for AI (HEAT-AI) offers a risk-based regulatory model tailored for HEIs to ensure accountability in detecting AI-generated content [15]. Effective integration in settings such as Kazakhstan therefore requires combining advanced detection tools, clear institutional guidelines, pedagogical adjustments, and vigilant human oversight to uphold academic integrity without unfairly penalizing students.

These studies all together demonstrate the progression of text classification methodologies, transitioning from initial architectures highlighting either local feature extraction or sequential modeling to hybrid approaches that blend these functions, finishing in transformer-based methods that represent intricate contextual relationships. The consequences for higher education are important: the great efficiency of these models provides a good basis for the development of automated verification systems as academic institutions face the difficulty of spotting submissions created by artificial intelligence and maintaining academic integrity. Nonetheless, important domains for ongoing study are dataset variety, model generalization, and the use of new transformer topologies.

Materials and research methods.

Data Description

The "LLM - Detect AI Generated Text Dataset" [16] was chosen for this research and was obtained from Kaggle. Academic essays categorized as either human-written or AI-generated make up the dataset. To standardize the inputs, raw text samples were first preprocessed—that is, converted to lowercase and punctuation removed. Using an 80/20 ratio, the dataset was split into training and validation subsets thereby preserving balanced class distributions in both sets. To guarantee consistency in input dimensions, uniform preprocessing—including tokenization, normalization and padding to a set length of 512 tokens with PyTorch's `pad_sequence`—was applied across all models.

Model Architectures

The first method utilizes a standard LSTM-based model for identifying AI-generated text. As seen in Figure 1, the input goes through preprocessing, before its transformation into a sequence of token indices. These indices are then passed to a 128-dimensional embedding layer, which converts them into dense vector representations. A bidirectional LSTM with two layers and a hidden size of 256 subsequently handles the embeddings. The output from the final time step of the LSTM is processed through a dropout layer and subsequently directed into a fully connected classifier, yielding a single logit for binary classification. This model utilizes extensive sequential data inside the text, rendering it proficient at differentiating between human-generated and AI-generated content.

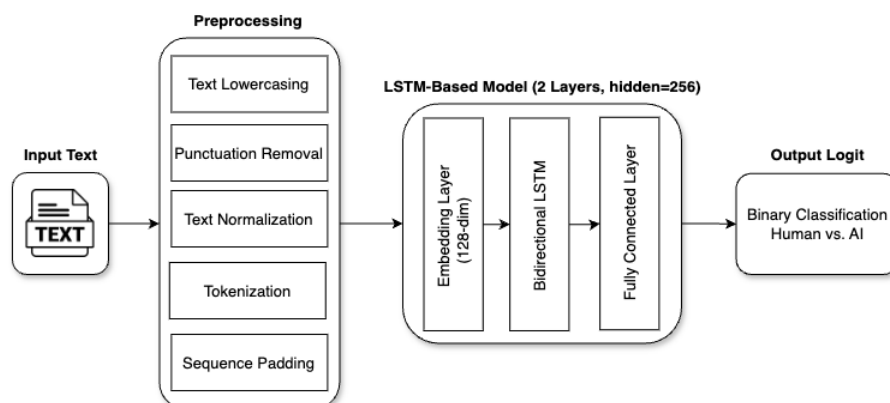


Figure 1 – LSTM-based detection model

The second method employs a hybrid model that integrates convolutional and LSTM layers to capture both local and long-range dependencies in text. As shown in Figure 2, the preprocessing steps, are similar to those of the LSTM-based method. Post-preprocessing, token indices are converted into 128-dimensional embeddings, subsequently processed through a 1D convolutional layer featuring 100 filters and a kernel size of 3 to extract local features. A ReLU activation and dropout layer follow, with the convolutional outputs reshaped to serve as input for a bidirectional LSTM with a hidden dimension of 128. The final forward and backward hidden states are concatenated and directed to a fully connected layer, producing a single logit for binary classification. By combining CNN-based feature extraction with LSTM-based temporal modeling, this architecture efficiently differentiates human-authored text from AI-generated content.

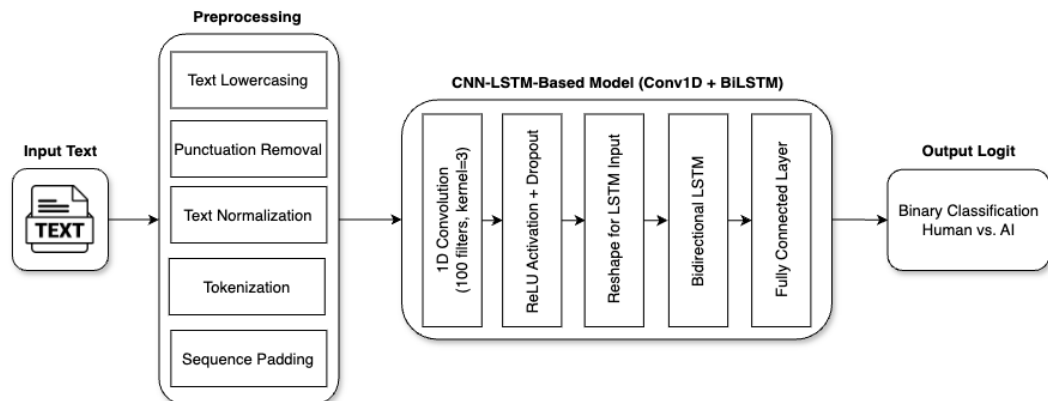


Figure 2 – CNN-LSTM-based hybrid detection model

The final method utilizes a transformer-based model—specifically GPT-2—fine-tuned for sequence classification. Figure 3 illustrates that the input text undergoes initial preprocessing, followed by tokenization via the GPT-2 tokenizer, which use the end-of-sequence token for padding and limits sequences to 512 tokens. A data collator dynamically manages padding at runtime. The generated token IDs and attention masks are subsequently fed into GPT2ForSequenceClassification, a model that incorporates a classification head on top of the pre-trained GPT-2 transformer. Leveraging the extensive contextual embeddings acquired from unsupervised pre-training, the model may be fine-tuned to effectively differentiate between AI-generated text and human-written information.

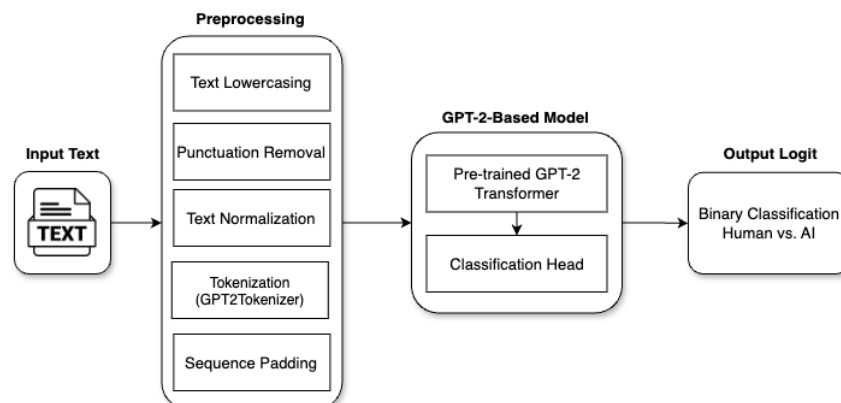


Figure 3 – GPT-2-based detection model

Experimental Setup

All models were implemented via PyTorch and trained on GPU-enabled hardware to guarantee efficient computation. The training procedure was the same across models: each

underwent training for 10 epochs with consistent data preprocessing, normalization, tokenization, and sequence padding to ensure a fair comparison. The Adam optimizer, with a learning rate of $1e-3$, was used for the LSTM-based and CNN-LSTM hybrid models, while training stability was further enhanced by gradient clipping (maximum norm of 1.0) and a ReduceLROnPlateau learning rate scheduler. The GPT-2 model was fine-tuned with the Hugging Face Trainer API with a learning rate of $2e-5$ and batch sizes of 4 for training and 8 for assessment. Evaluation measures, such as accuracy, precision, recall, and F1-score, were calculated on the validation set utilizing standard functions from scikit-learn, while hyperparameters were refined by grid search to guarantee optimal performance.

To systematically assess model performance, we utilize four established assessment metrics—Accuracy, Precision, Recall, and F1-score—as delineated below:

Accuracy reflects the overall correctness of classification and is computed as:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

where TP and TN are true positives and true negatives, and FP and FN are false positives and false negatives, respectively.

Precision indicates the proportion of texts labeled as AI-generated that truly are AI-generated:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

with TP as correctly identified AI-generated texts and FP as misclassified human texts.

Recall (sensitivity) measures the fraction of actual AI-generated texts detected:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

where FN are AI-generated texts missed by the model.

F1-score harmonizes Precision and Recall into a single value:

$$F1 = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (4)$$

balancing both false positives and false negatives.

Results and their discussion.

We evaluated the performance of the three models—GPT-2-based, LSTM-based, and CNN-LSTM hybrid—on identifying AI-generated text using the standardized dataset outlined in Section III.A. The research concentrated on quantifying essential performance parameters, including accuracy, precision, recall, and F1-score on the validation set. Table 2 encapsulates the performance metrics: The GPT-2-based model attained an accuracy of 96.88%, with precision, recall, and F1-score of 96.96%, 96.74%, and 96.85%, respectively; the CNN-LSTM hybrid model achieved an accuracy of 95.16% and an F1-score of 94.94%; whereas the LSTM-based model secured an accuracy of 94.64% and an F1-score of 94.29%.

Table 2 – Performance Comparison of GPT - 2, CNN - LSTM, and LSTM Models

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
GPT - 2 Based	96.88%	96.96%	96.74%	96.85%
CNN - LSTM Hybrid	95.16%	94.28%	96.61%	94.94%
LSTM - Based	94.64%	93.43%	95.17%	94.29%

Figure 4 displays a bar chart that contrasts the performance metrics—Accuracy, Precision, Recall, and F1-Score—of the three models: GPT-2-based, CNN-LSTM hybrid, and LSTM-based. The chart distinctly illustrates that the GPT-2-based model maintains an overall performance advantage across all metrics, while the CNN-LSTM hybrid and LSTM-based models follow closely with slightly lower values.

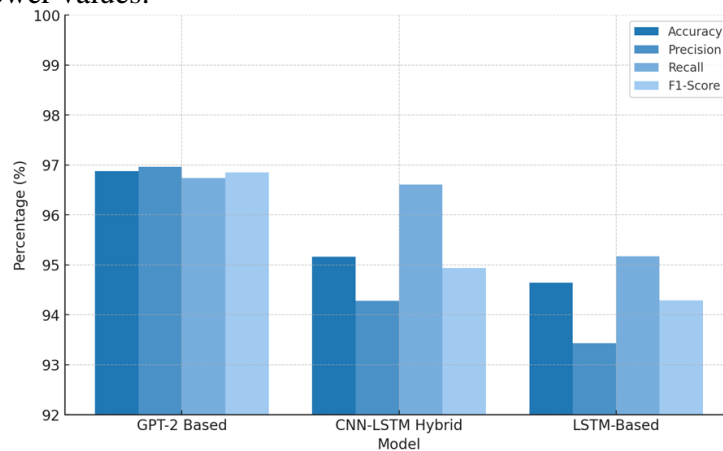


Figure 4 – GPT-2, CNN-LSTM, and LSTM Model Performance Metrics

A representation of the training loss curves for each model over the course of ten epochs is presented in Figure 5. The line graph illustrates the convergence behavior and stability of the training process, with all models exhibiting a consistent reduction in loss as training advances.

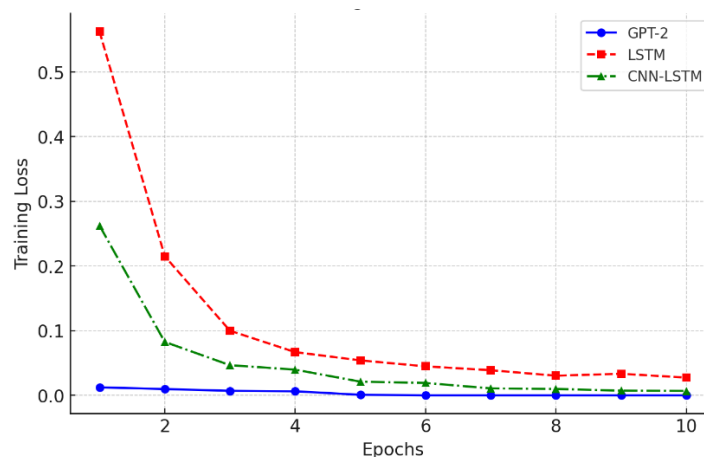


Figure 5 – Training Loss Curves for GPT-2, LSTM, and CNN-LSTM Models

As seen in Figure 6, the F1 score for each of the three models has changed during the course of the training epochs. This graph demonstrates the enhancements in classification performance throughout fine-tuning, further validating the robustness of each approach.

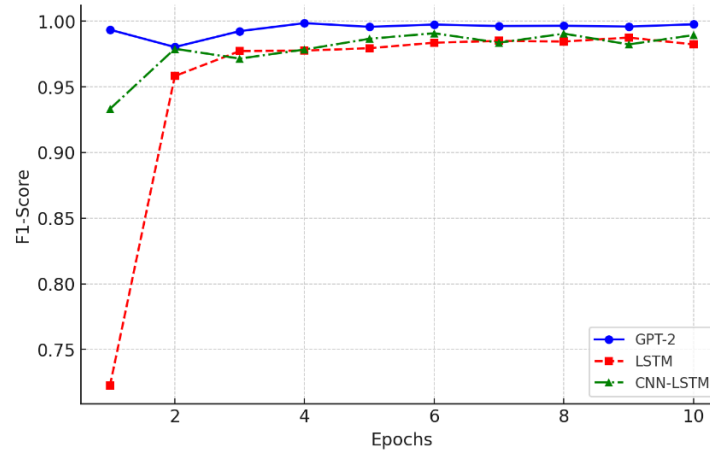


Figure 6 – F1-Score Progression Over Training Epochs for GPT-2, LSTM, and CNN-LSTM Models

To clarify the individual failure scenarios of each model, we provide a comprehensive error analysis in Figure 7. The GPT-2 detector demonstrates minimal misclassifications, recording only one false positive and six false negatives, suggesting that its deep contextual representations proficiently disambiguate the majority of samples, however it may sometimes misread exceedingly concise human-written or AI-generated texts. The CNN-LSTM hybrid has a greater yet balanced error profile, including thirty false positives and thirteen false negatives, illustrating the trade-off associated with merging local feature extraction with sequential modeling. The LSTM baseline, although computationally efficient, has the highest total mistake count (sixty false positives and nineteen false negatives), indicating challenges in recognizing the subtle textual patterns that differentiate human and AI outputs. Figure 7 quantifies different mistake kinds, emphasizing specific goal areas: minimizing false positives for GPT-2, adjusting threshold sensitivity for the hybrid model, and enhancing context modeling for LSTM, thereby directing future improvements in detection robustness.

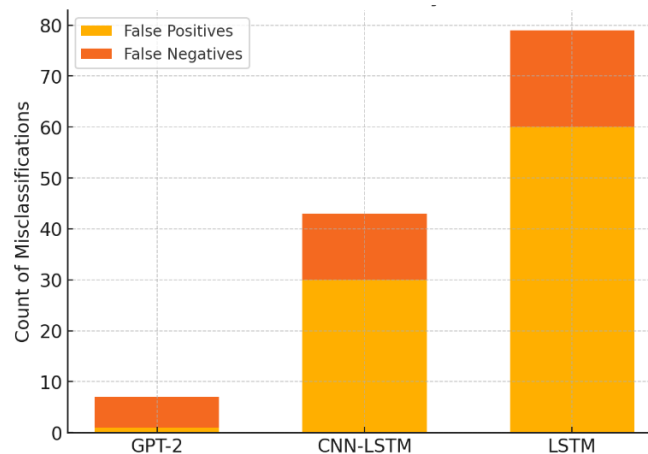


Figure 7 – Misclassification Breakdown for AI-Text Detection Models

Clear trade-offs between the three approaches are shown by a comparative analysis. Although the GPT-2-based model requires more computer resources and longer training times, it uses deep contextual representations acquired by transfer learning to produce somewhat improved results. By combining local feature extraction with sequential modeling, the CNN-LSTM hybrid model offers a good balance between computational economy and excellent accuracy. On the other hand, even if it is slightly less accurate, the LSTM-based model provides a simpler and more

economical baseline. The results show that specific application demands, including the requirement for high accuracy compared to available computer resources, should guide model selection.

In order to evaluate our detectors' resilience in a real-world educational setting, we put them to the test using twenty anonymized student assignments from an undergraduate course and concurrently produced twenty comparable AI-generated works for the same assignment with a GPT-based text generator. Upon assessment using both the CNN-LSTM and GPT-2 detectors, authentic student submissions exhibited AI-generation probabilities ranging from 72 % to 86 %, indicative of occasional templated phrases, whereas the AI-generated submissions for identical assignments attained scores of 96 % to 98 %, thereby validating their artificial origin. Moving forward, incorporating additional data from diverse disciplines into our training set will further improve model calibration, reduce false positives, and adapt to new writing styles and assignment formats.

It is crucial to balance the computational demands and the infrastructure that is available when implementing these models in real-world learning environments. Transformer-based classifiers impose considerable memory and processing demands due to their multi-headed attention methods and deep architecture, occasionally requiring specialized accelerators or scalable cloud resources to provide satisfactory response times. In contrast, a hybrid architecture that integrates convolutional feature extractors with a recurrent layer can function effectively on less powerful hardware—such as ordinary servers or CPU-only systems—without significantly compromising detection performance. The hybrid method is especially appropriate for schools that need to reconcile academic integrity measures with financial and operational constraints. Model selection should ultimately be informed by an institution's available computational resources, maintenance capabilities, and the required level of detection robustness.

Considering the trade-offs in precision, computational demands, and intricacy, we utilized GPT-2 for its superior detection capabilities, the CNN-LSTM hybrid for its ideal equilibrium of efficiency and resilience, and the LSTM model for its simplicity and low resource requirements - together accommodating a broad spectrum of institutional needs.

Conclusion.

Finally, our comparison of three deep learning approaches—GPT-2-based, CNN-LSTM hybrid, and LSTM-based models—for recognizing AI-generated text shows that every strategy has better performance on the validation set. Thanks to its powerful contextual representations and transfer learning capacity, the GPT-2-based model attained the highest accuracy and F1-score. Concurrently, via clever integration of local feature extraction and sequential modeling, the CNN-LSTM hybrid model obtained a great balance between accuracy and computing efficiency. Especially in environments with limited computing resources, the LSTM-based model offers a dependable baseline even if its relative simplicity and minimal resource needs show a lower raw accuracy.

Especially in higher education, these results have major implications for artificial intelligence text detection. Maintaining academic integrity in digital learning environments depends on the ability to autonomously and accurately distinguish between human-generated and artificial intelligence-generated material. Our results show that although they somewhat increase performance, transformer-based models require more computing resources. On practical uses where resource constraints are major, hybrid systems are appealing solutions as they can provide equivalent accuracy with less complexity.

Future research will aim to extend the evaluation scope by incorporating bigger and more diverse datasets, exploring other hybrid model configurations, and refining hyperparameter tuning to enhance detection accuracy and adaptability in real educational settings.

References

1. Mishra, S. (2023). Enhancing Plagiarism Detection: The Role of Artificial Intelligence in Upholding Academic Integrity. *Library Philosophy & Practice*.

2. Weber-Wulff, D., Anohina-Naumeca, A., Bjelobaba, S., Foltýnek, T., Guerrero-Dib, J., Popoola, O., Šigut, P., & Waddington, L. (2023). Testing of detection tools for AI-generated text. *International Journal for Educational Integrity*, 19(1), 26. <https://doi.org/10.1007/s40979-023-00146-z>.
3. Luan, Y., & Lin, S. (2019). Research on text classification based on CNN and LSTM. *In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)* (pp. 352–355). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAICA.2019.8873454>.
4. Alshingiti, Z., Alaqel, R., Al-Muhtadi, J., Haq, Q. E. U., Saleem, K., & Faheem, M. H. (2023). A Deep Learning-Based Phishing Detection System Using CNN, LSTM, and LSTM-CNN. *Electronics*, 12(1), 232. <https://doi.org/10.3390/electronics12010232>.
5. Tang, R., Chuang, Y.-N., & Hu, X. (2024). The science of detecting LLM-generated text. *Communications of the ACM*, 67(4), 50–59. <https://doi.org/10.1145/3624725>.
6. Zulqarnain, M., Ghazali, R., Hassim, Y. M. M., & Rehan, M. (2020). A comparative review on deep learning models for text classification. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 19(1), 325–335. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v19.i1.pp325-335>
7. Kayabas, A., Topcu, A. E., Alzoubi, Y. I., & Yıldız, M. (2025). A Deep Learning Approach to Classify AI-Generated and Human-Written Texts. *Applied Sciences*, 15(10), 5541. <https://doi.org/10.3390/app15105541>.
8. Utku, A. (2024). Hybrid CNN-LSTM model for fake news detection. *Malatya Turgut Özal University Journal of Engineering and Natural Sciences*, 5(2), 28–36. <https://doi.org/10.46572/naturengs.1571897>.
9. Walker, E., Evans, L., Mitchell, A., Zhang, Z., Patel, R., & Chen, I. (2024). Text classification in detection of AI-generated content using BERT [Manuscript under review]. *Machine Learning and Systems Conference*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30193.90722>.
10. Radford, A., Wu, J., Child, R., Luan, D., Amodei, D., & Sutskever, I. (2019). Language models are unsupervised multitask learners. *OpenAI Blog*
11. Guerrero, J. A. (2023). Detecting AI generated text using neural networks (Master's thesis, Texas A&M University).
12. Kaibassova, D., & Nurtay, M. (2022). The comparative analysis of machine learning models for quality assessment of textual academic works. *In Proceedings of the 2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIST54437.2022.9945714>.
13. Mulenga, R., & Shilongo, H. (2024). Academic integrity in higher education: Understanding and addressing plagiarism. *Acta Pedagogica Asiana*, 3(1), 30–43. <https://doi.org/10.53623/apga.v3i1.337>
14. Chan, C. K. Y. (2023). A comprehensive AI policy education framework for university teaching and learning. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20, Article 38. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00408-3>.
15. Temper, M., Tjoa, S., & David, L. (2025). Higher Education Act for AI (HEAT-AI): A framework to regulate the usage of AI in higher education institutions. *Frontiers in Education*, 10, Article 1505370. <https://doi.org/10.3389/educ.2025.1505370>.
16. Thite, S. (2023). LLM – Detect AI generated text dataset (Version 1) [Data set]. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/sunilthite/llm-detect-ai-generated-text-dataset/data>.

**СТУДЕНТТЕРДІҢ МӘТІНДІК ТАПСЫРМАЛАРЫНДАҒЫ ЖАСАНДЫ
ИНТЕЛЛЕКТИМЕН ЖАСАЛҒАН МӘТІНДІ АНЫҚТАУ МОДЕЛЬДЕРІНІҢ
САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ**

Аңдатпа. Қазіргі трансформерлік модельдер автоматты мәтін генерациясының мүмкіндіктерін едәуір кеңейтіп, жоғарғы оқу орындарында академиялық адалдықты

қамтамасыз етуде жаңа сынақтарды туындатты. Дәстүрлі антиплагиат жүйелері студенттің өзіндік жұмысы мен жасанды интеллектпен жасалған материалды ажырата алмайды, сондықтан сенімді автоматты анықтаушылар әзірлеу өзекті болып табылады. Осыған байланысты мақалада студенттік жұмыстардағы III-генерацияланған мәтінді анықтаудың үш негізгі әдісінің салыстырмалы талдауы жүргізілді. Зерттеу нысаны – GPT-2 трансформеріне негізделген алдын ала оқытылған классификатор, CNN-LSTM гибридік архитектура және классикалық LSTM-моделі. Зерттеу міндеттері: эксперименттік протоколды біріздендіру, деректерді сапалы алдын ала өңдеу және әр тәсілдің есептеу қуаты мен дәлдік талаптарына сәйкес тиімділігін жан-жақты бағалау. Зерттеу әдістемесі алдын ала өңделген студенттік жұмыстар корпусын бірегей токенизация және оптимизация параметрлерімен оқу және тексеру жиынтықтарына бөлу, модельдерді бірнеше эпохада бірдей гиперпараметрлермен дайындау, нәтижелерді дәлдік, қамту және F1-көрсеткіштері бойынша салыстырудан тұрады. Нәтижелер көрсеткендей, трансформерлік детектор ең терең контекстік бейнеленуді қамтамасыз етіп, ең жоғары дәлдік көрсетіп, CNN-LSTM гибриді жылдамдық пен сапаны тиімді теңестірсе, LSTM-моделі GPU-қолдаусыз ортада ресурсты үнемдейтін базалық шешім ретінде оңтайлы екенін дәлелдеді. Қорытындысында авторлар инфрақұрылым талаптарына сәйкес әдісті таңдау маңызды екенін атап, жоғары өнімді GPU серверлері үшін трансформерлік архитектураларды, орта деңгейлі аппараттық платформада гибридік шешімдерді, ал тек CPU-негізіндегі ортада LSTM-модульдерді қолдануды ұсынады. Практикалық ұсыныс ретінде гибридік детекторды білім беру платформаларына сараптамалық рецензиямен бірге енгізіп, оқыту дерекқорын үнемі жаңартып отыруды ұсынады.

Түйін сөздер: Терең оқыту, Жасанды интеллектпен жасалған мәтін, Академиялық адалдық, GPT-2, CNN-LSTM гибридік моделі, LSTM, Мәтінді жіктеу, Трансформерлік модельдер, Гибридік модельдер.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ ТЕКСТА, СГЕНЕРИРОВАННЫХ ИИ, В ТЕКСТОВЫХ ЗАДАНИЯХ СТУДЕНТОВ

Аннотация. Современные трансформерные модели существенно расширили возможности автоматической генерации текстов, что создаёт новые вызовы для обеспечения академической честности в вузах. Системы антиплагиата нередко не различают работы, написанные студентом, и материалы, сгенерированные искусственным интеллектом, что обуславливает актуальность разработки надёжных автоматических детекторов. В связи с этим в данной статье выполнен сравнительный анализ трёх подходов к обнаружению ИИ-генерированного текста в студенческих работах. Предмет исследования — особенности работы классификатора на базе GPT-2, гибридной архитектуры CNN-LSTM и классической LSTM-модели. Задачи включают формирование единого экспериментального протокола и оценку каждого метода в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и различных требований к точности. Экспериментальная методика исследовательской работы состоит из единообразной предобработки размеченного корпуса студенческих работ, разделения данных на обучающую и валидационную выборки, обучения моделей в несколько эпох с одинаковыми параметрами токенизации и оптимизации, а также оценки их эффективности по показателям точности, полноты и F1-меры. Результаты исследования показывают, что детектор на основе трансформера обеспечивает наиболее глубокое контекстное представление, гибридный CNN-LSTM демонстрирует оптимальный баланс между скоростью обработки и качеством обнаружения, а LSTM-модель остаётся эффективным и ресурсосберегающим решением для систем без доступа к GPU. Авторы пришли к выводу, что выбор метода должен основываться на доступной инфраструктуре: трансформеры

подходят для высокопроизводительных серверов с GPU, гибридные архитектуры — для платформ средней производительности, а LSTM-модули — для CPU-окружения. В качестве практической рекомендации авторами предлагается интегрировать гибридный детектор в образовательные платформы совместно с экспертным рецензированием и регулярно обновлять обучающую базу для адаптации к новым типам ИИ-контента.

Ключевые слова: Глубокое обучение, Текст, сгенерированный ИИ, Академическая честность, GPT-2, Гибридная модель CNN-LSTM, LSTM, Классификация текста, Трансформерные модели, Гибридные модели.

Сведение об авторах

Сагынбаев Алмаз Асылбекулы	Магистрант, Департамент Компьютерной Инженерии, Astana IT университет, Астана, Казахстан, E-mail: 232040@astanait.edu.kz
Кайбасова Динара Женисбековна	PhD, Доцент, Департамент Компьютерной инженерии, Astana IT университет, Астана, Казахстан, E-mail: dinara.kaibasova@astanait.edu.kz
Сагынбаева Айтолкын Асылбекқызы	Сеньор-лектор, Школа Креативной Индустрии, Астана IT университет, Астана, Казахстан, E-mail: Aitolkyn.sagynbayeva@astanait.edu.kz

Авторлар туралы мәлімет

Сагынбаев Алмаз Асылбекулы	Магистрант, Компьютерлік Инженерия Департаменті, Astana IT университеті, Астана, Қазақстан, E-mail: 232040@astanait.edu.kz
Кайбасова Динара Женисбековна	PhD, Компьютерлік Инженерия Департаменті, Astana IT университетінің қауымдастырылған профессоры, Астана, Қазақстан E-mail: dinara.kaibasova@astanait.edu.kz
Сагынбаева Айтолкын Асылбекқызы	Сеньор-лектор, Шығармашылық Индустрия Мектебі, Астана IT университеті, Астана, Қазақстан, E-mail: Aitolkyn.sagynbayeva@astanait.edu.kz

Information about the authors

Sagynbayev Almaz Assylbekuly	Master's student, Department of Computer Engineering, Astana IT University, Astana, Kazakstan, E-mail: 232040@astanait.edu.kz
Kaibassova Dinara Zhenisbekovna	PhD, Associate Professor, Department of Computer Engineering in Astana IT University, Astana, Kazakstan, E-mail: dinara.kaibasova@astanait.edu.kz
Sagynbayeva Aitolkyn Assylbekkyzy	Senior lecturer, School of Creative Industries, Astana IT University, Astana, Kazakstan E-mail: Aitolkyn.sagynbayeva@astanait.edu.kz



ӘОЖ 004.934.1

ҒТАХА 20.19.00

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_14

Д. Рахимова¹, А. Ж. Жігер^{1,2*}, В. Малых³

¹әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Нархоз университеті, Алматы, Қазақстан

³Санкт-Петербург мемлекеттік ақпараттық технологиялар, механика және оптика университеті, Санкт-Петербург, Ресей

*E-mail: alia_94-22@mail.ru

ҚҰҚЫҚТЫҚ МӘТІНДЕРДІ ҚАЗАҚ, ОРЫС ТІЛДЕРІНЕ НЕЙРОНДЫ МАШИНАЛЫҚ АУДАРУДЫҢ ӘДІСТЕРІ МЕН САПАЛЫҚ ТАЛДАУЫ

Аңдатпа. Қазіргі таңда Қазақстан Республикасында құқық саласындағы мәтіндерді қазақ тілінен орыс және ағылшын тілдеріне, сондай-ақ осы тілдерден қазақ тіліне сапалы аудару – өзекті мәселелердің бірі болып отыр. Бұл ғылыми жұмыста кеңінен қолданылатын Яндекс пен Гугл секілді машиналық аударма жүйелері арқылы арнайы құқықтық дереккөздерден алынған мәтіндердің қазақ-орыс тіл жұбы негізінде аударылып, аударма сапасындағы қателіктерге талдау жүргізілді.

Зерттеудің негізгі мақсаты – құқық саласына тән сөйлемдер мен терминдерді дәл әрі мағыналық тұрғыдан дұрыс аудару жолдарын қарастыру. Осы мақсатта құқықтық құжаттар, сот шешімдері мен ресми сайттардан арнайы бағдарлама көмегімен 96 555 сөйлем мен сөз тіркестерінен тұратын корпус жинақталды.

Аталған корпус MarianMT нейронды машиналық аударма жүйесінде оқытылып, қазақ-орыс тіл жұбында аударма сапасы тәжірибе арқылы тексерілді. MarianMT моделінің нәтижелерін жақсарту үшін қосымша KazRobert трансформерлік моделі қолданылды. Жұмыста KazRobert моделінің архитектурасы мен оның математикалық негізі жан-жақты сипатталады.

Аударма сапасы BLEU, TER және METEOR секілді халықаралық деңгейде мойындалған өлшемдер арқылы бағаланды. Жұмыста екі түрлі нәтиже салыстырмалы түрде көрсетілді: тек MarianMT жүйесінде алынған нәтиже және KazRobert моделінде оқытылған MarianMT жүйесінің нәтижесі. Талдау қорытындысы бойынша, ұсынылған әдіс OpenNMT негізіндегі бұрынғы аударма моделіне қарағанда сапалы нәтижелер көрсетті.

Жүргізілген тәжірибелер корпус көлемі мен терминдердің саны артқан сайын аударма сапасының да жақсара түсетінін көрсетті. Сонымен қатар, зерттеу нәтижелері бұл әдісті құрылымдық жағынан қазақ тіліне жақын түркі тілдеріне де тиімді түрде бейімдеуге болатынын дәлелдеді.

Түйін сөздер: нейронды машиналық аударма, MarianMT машиналық аударма, KazRobert моделі, трансформер моделі, құқық саласындағы корпус, BLEU аударма көрсеткіші, TER аударма көрсеткіші, METEOR аударма көрсеткіші.

Кіріспе.

Қазақстан Республикасында әртүрлі ұлт өкілдерінің өмір сүруіне байланысты заң аясындағы іс-қағаздар мемлекеттік тіл – қазақ тілімен қатар, орыс және ағылшын тілдерінде де жүргізіледі. Қазіргі таңда, дамыған машиналық аударма жүйелері, мысалы, Yandex және Google, сондай-ақ жасанды интеллект технологияларына қарамастан, құқық саласындағы мәтіндер орыс және ағылшын тілдерінен қазақ тіліне және керісінше қазақ тілінен орыс және ағылшын тілдеріне аударылғанда қателіктердің бар екендігі анықталды. Бұл қателіктердің негізгі себептері қазақ тілінің құрылымдық ерекшеліктерімен тікелей байланысты.

Атап айтқанда, қазақ тілінің морфологиялық құрылымы (жалғаулар мен жұрнақтар түрлерінің көптігі және түбірге жалғану ережелерінің түрлілігіне байланысты), мысалы, егер түбір қатаң дыбысқа аяқталса, жалғанатын қосымшаның да қатаң дыбыстан басталуы міндетті. Сонымен қатар, түбірдің жуан не жіңішке болуына байланысты оның жалғаулары да сәйкес дыбыстармен қолданылуы қажет. Синтаксистік құрылым тұрғысынан алғанда, қазақ тілінде көп сөйлемдер күрделі және құрмалас түрінде болады, ал бұл орыс және ағылшын тілдерінде кеңінен қолданылатын қарапайым құрылымдарға қарағанда өзгеше. Құрмалас сөйлемдерде жай сөйлемдердің арасындағы байланыстың түрлі ережелері бар, сондықтан олардың дұрыс аударылуы қиындық туғызады. Семантикалық аспект бойынша да кейбір қарапайым сөйлемдер орыс немесе ағылшын тілінен қазақ тіліне аударылғанда, мағыналық тұрғыдан толық үйлеспейтін жағдайлар орын алады. Бұл әсіресе сөйлемдерде қысқартулар, тұрақты тіркестер, болымсыз сөйлемдер мен құқықтық публицистикалық стильдегі мәтіндерде жиі кездеседі.

Қазақ тілінің құрылымдық ерекшеліктері мен осы ерекшеліктерге байланысты туындайтын аударма қателіктері жоғарыда көрсетілген. Сонымен қатар, машиналық аударма модельдері қазақ тілінің ерекшеліктеріне бейімделмеген жағдайда, аударма сапасының төмендігі байқалады. Нейронды машиналық аударманың осы мәселелерді шешудегі тиімділігіне қатысты, көп корпус жинақтап, қазақ-орыс немесе қазақ-ағылшын тілдеріндегі мәтіндер мен сөз тіркестерінің оқылауы процесі де қателіктерге себеп болады.

Төменде құқық саласындағы мәтіндердің Яндекс және Google машиналық аударма жүйелері арқылы аударылған нәтижелері мен олардың дұрыс аудармалары салыстырылып, аударма қателіктері сипатталады. Бұл жұмыста, құқық саласына арналған ағылшын-қазақ және орыс-қазақ тілдеріндегі аудармаларға негізделген деректі сөз тіркестері мен сөйлемдер арнайы құқықтық ақпарат көздерінен алынып, құқықтық терминдерді анықтап, оларды бөлектеп шығаратын бағдарлама құрылды. Осы бағдарлама арқылы 90 мыңнан аса корпус жинақталып, MarianMT ашық нейронды кодымен арнайы қазақ тіліне бейімделген трансформер моделі арқылы аударылды. Аудармадан алынған қателіктер KazRobert моделінің көмегімен постредакторленіп, аударма сапасы жақсартылады.

Кесте 1 – Яндекс және Google машиналық аударма жүйелерінен алынған құқық саласындағы мәтіндердің аударма сапасын көрсету

Негізгі мәтін	Яндекс машиналық аударма	Гугл машиналық аударма	Негізгі аударма	Аударма қателігі
Стороны заключили договор аренды, регулируемый положениями	Тараптар Ресей Федерациясының Азаматтық кодексінің ережелерімен реттелетін	Тараптар Ресей Федерациясының Азаматтық кодексінің ережелерімен реттелетін	Тараптар Ресей Федерациясының Азаматтық кодексінің	Аударма жағынан қателік жоқ. Публицистикалық стиль жағынан ғана

Гражданского кодекса Российской Федерации.	жалдау шартын жасады.	жалдау шартын жасады.	нормаларына сәйкес реттелетін жалдау шартын жасасты.	жақсарды.
В случае нарушения условий настоящего договора одной из сторон, другая сторона вправе в одностороннем порядке отказать от исполнения обязательств, предупредив об этом контрагента не менее чем за 10 (десять) календарных дней до предполагаемой даты расторжения договора.	Тараптардың бірі осы Шарттың талаптарын бұзған жағдайда, екінші Тарап бұл туралы контрагентті Шартты бұзудың болжамды күніне дейін кемінде күнтізбелік 10 (он) күн бұрын алдын ала хабардар ете отырып, міндеттемелерді орындаудан біржақты тәртіппен бас тартуға құқылы.	Тараптардың бірі осы шарттың талаптарын бұзған жағдайда, екінші тарап бұл туралы контрагентті шартты бұзудың болжамды мерзіміне дейін кемінде 10 (он) күнтізбелік күн бұрын хабардар ете отырып, міндеттемелерді орындаудан біржақты тәртіппен бас тартуға құқылы.	күніне дейін кемінде 10 (он) күнтізбелік күн бұрын ескерте	«Болжамды күніне дейін» → «Күтілетін күніне дейін» "Болжамды" сөзі жалпы мағынада қолданылады және кейде нақты емес мағына береді. Ал "күтілетін" сөзі заң тілінде жиі қолданылады және неғұрлым нақты, ресми стильге сәйкес келеді. екеуі де рұқсат етіледі.
В случае нарушения одной из сторон существенных условий настоящего договора, повлекшего невозможность дальнейшего исполнения обязательств другой стороной, последняя вправе в	Тараптардың бірі екінші Тараптың міндеттемелерді одан әрі орындай алмауына әкеп соққан осы шарттың елеулі талаптарын бұзған жағдайда, соңғысы жазбаша хабарлама жібере	Тараптардың бірі осы шарттың маңызды талаптарын екінші тараптың міндеттемелерді одан әрі орындау мүмкін еместігіне әкеп соққан бұзған жағдайда, соңғысы жазбаша хабарлама жіберу арқылы біржақты	Егер Тараптардың бірі осы Шарттың елеулі талаптарын бұзып, нәтижесінде екінші Тараптың шарттық міндеттемелерін әрі қарай орындауы мүмкін болмаса, екінші Тарап	Соңғысы" — дұрыс қолданылған, бірақ күрделі заң мәтіндерінде түсініксіздік болмас үшін "екінші Тарап" деп нақтылап жазған дұрыс. "Бастамашылық жасауға құқылы" — мағынасы дұрыс, бірақ сәл артық айтылған. Жай ғана

<p>одностороннем внесудебном порядке инициировать расторжение договора с направлением письменного уведомления, при этом нарушившая сторона обязуется компенсировать все документально подтверждённые убытки, включая прямой ущерб, упущенную выгоду, а также иные расходы, понесённые в связи с невыполнением или ненадлежащим выполнением договорных обязательств, в соответствии с положениями действующего гражданского законодательства.</p>	<p>отырып, шартты біржақты соттан тыс тәртіппен бұзуға бастамашылық жасауға құқылы, бұл ретте Тарап тікелей залалды, жоғалған пайданы, сондай-ақ басқа да шығыстарды қоса алғанда, құжатталған барлық залалдарды өтеуге міндеттенеді. қолданыстағы азаматтық заңнаманың ережелеріне сәйкес шарттық міндеттемелерді орындамау немесе тиісінше орындамау.</p>	<p>тәртіпте шартты соттан тыс бұзуға бастамашылық жасауға құқылы, бұл ретте бұзушы тарап барлық құжатталған залалдарды, оның ішінде тікелей байланысты жоғалтқан пайданы, сондай-ақ жоғалған залалды өтеуге міндеттенеді. қолданыстағы азаматтық заңнаманың ережелеріне сәйкес шарттық міндеттемелерді орындау немесе тиісінше орындамау.</p>	<p>жазбаша түрде хабарлай отырып, шартты біржақты соттан тыс тәртіппен бұзуға құқылы. Бұл ретте, шартты бұзған Тарап қолданыстағы азаматтық заңнамада көзделген тәртіпке сәйкес, тікелей залалды, жоғалған пайданы, сондай-ақ өз міндеттемелерін орындамауын а немесе тиісінше орындамауын а байланысты туындаған өзге де құжатпен расталған шығыстарды өтеуге міндетті.</p>	<p>"шартты бұзуға құқылы" деп жазған жеткілікті, себебі "бастамашылық" деген сөз бұл жерде артық.</p> <p>Соңғы сөйлем "қолданыстағы азаматтық заңнаманың ережелеріне сәйкес..." деп басталады, бірақ негізгі сөйлеммен грамматикалық түрде дұрыс байланыспаған. Оны толық сөйлем ретінде біріктірген жөн.</p>
--	---	---	--	---

Бұл қателіктерді салыстыра отырып, келесі қорытынды жасауға болады: Яндекс және Google машиналық аударма жүйелерінде орын алған аударма қателіктерінің арасында публицистикалық стильдің дұрыс қолданылмауы байқалады. Аударма мәтіндерінде жиі кездесетін мәселелердің бірі — мәтіндер мен сөйлемдердің ауызекі сөйлеу стилінде берілуі, бұл өз кезегінде ғылыми немесе құқықтық мәтіндерге тән ресми стильге сәйкес келмейді. Сонымен қатар, эксперимент барысында морфологиялық құрылымы жағынан сөздер мен сөйлемдер дұрыс байланыспаған жағдайлар да анықталды.

Бұл қателіктерді азайтып, аударма сапасын жақсарту үшін аударма мәтінін постредакторлеу қажет екендігі анықталды. Яғни, корпустағы сөз тіркестері мен сөйлемдердің сапасын арттыру, құқық саласындағы терминдердің санын көбейту арқылы аударма нәтижелерін жетілдіруге болады. Бұл мақалада келесі тараулар қарастырылады:

2-тарау: Материалдар мен зерттеу әдістері.

3-тарау: Нәтижелер және оларды талқылау.

4-тарау: Қорытынды.

Материалдар мен зерттеу әдістері.

Қазіргі таңда Қазақстан мемлекетінде құқық саласындағы орыс, ағылшын тілдерінен қазақ тіліне және қазақ тілінен орыс пен ағылшын тілдеріне дұрыс аударма жасау өзекті мәселелердің бірі болып табылады. Бұл мәселе, әсіресе, көптілді қоғамда құқықтық мәтіндердің түсініктілігі мен дәлдігін қамтамасыз ету үшін маңызды. Соңғы 5 жыл ішінде көптеген ғалымдар құқық саласындағы мәтіндерді аударуда нейронды машиналық аударма технологияларын пайдаланған [1-4]. Мұндай аударма тәсілдері, әсіресе, тілдер арасындағы морфологиялық ерекшеліктер мен контекстік факторларды ескеру арқылы жоғары сапалы аудармалар алуға мүмкіндік береді.

Қазақстандық зерттеушілер ағылшын-қазақ және қазақ-ағылшын тіл жұптарында аударма сапасын жақсарту үшін тілдің морфологиялық құрылымын зерттеп, нейронды машиналық аудармаларға негізделген әдістерді қолдануда [5-7]. Бұл бағытта OpenNMT жүйесі арқылы тіл жұптары үшін жақсы нәтижелер алынғанын атап өтуге болады [8-10].

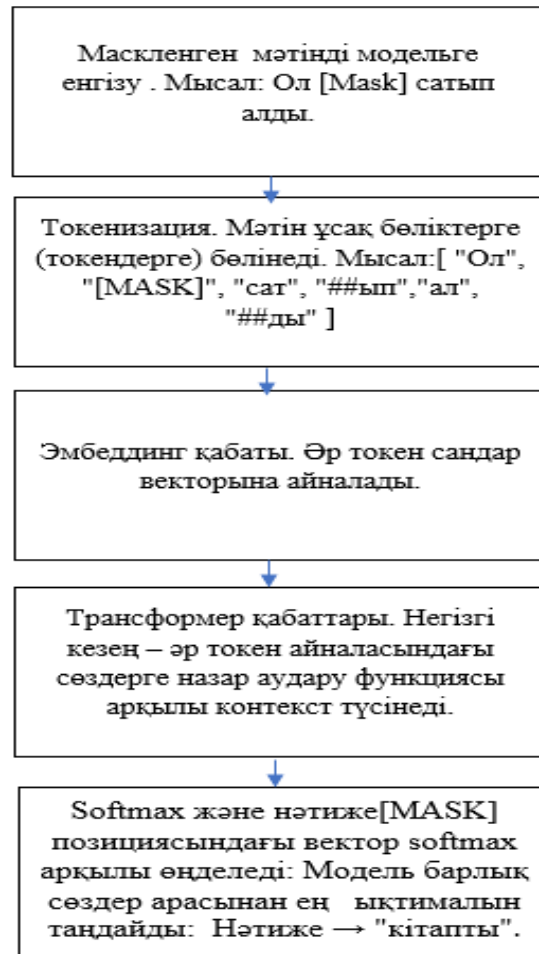
Аталған жұмыс аясында құқық саласындағы мәтіндерді аудару үшін арнайы корпус жасалды. Орыс-қазақ тіл жұптарынан құралған, 96 555 сөйлем мен сөз тіркестерінен тұратын корпус келесі Кесте 2 -де көрсетілген дереккөздерден алынды.

Кесте 2- Корпустағы сөйлемдер саны

Алынған дерек көздер	Сөйлемдер саны
Заң актілері	30561
Сот шешімдері	10005
Ресми веб-сайттар (үкіметтік, соттық, министрлік сайттары)	55989

Сонымен қатар корпустарды жинау үшін арнайы бағдарлама құрылды. Бұл бағдарлама pdf құжаттардан, құқық саласында сайттардан осы саладағы терминдер мен сөзтіркестері мен сөйлемдер алыну арқылы корпус жинақталды.

Осы жиналған корпустар MarianMT нейрондық машиналық аударма моделі арқылы оқытылды [11-13]. Аудармадан кейін қазақ тіліндегі аудармада қателер болды. Бұл аударма сапасын жақсартып, қателерден арылу үшін KazRobert моделінде оқытылды. KazRobert моделінің орындалу алгоритмі келесі қадамдардан тұрады:



Сурет 1 – KazRobert моделінің архитектурасын мысалмен көрсету

Жоғарыда көрсетілген KazRobert моделінің архитектурасын математикалық моделі бойынша түсіндіретін болсақ:

1. Енгізу қабаты. KazRoBERTa алдымен мәтінді токендерге бөледі және әр токенді вектор түріне түрлендіреді:

$$x_i = TokenEmb(\omega_i) + PosEmb(i) \quad (1)$$

мұнда:

ω_i – i – ші токен

$TokenEmb(\omega_i)$ – токен эмбеддинг

$PosEmb(i)$ – позициялық эмбеддинг (сөздердің ретін ескеру үшін)

2. Трансформер қабаттары (энкодер). Модель L қабаттан тұрады. Әр қабатта n -төрт негізгі бөлік бар [14-16]:

a) Көпқабат өзіндік назар (Multi-Head Self-Attention)

Әрбір қабатта сұраныс (Q), кілт (K) және мән (V) векторлары есептеледі:

$$Q = XW^Q, \quad K = XW^K, \quad V = XW^V \quad (2)$$

Назар функциясы:

$$Attention(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (3)$$

b) Көпқабатты назар функциясы:

$$MultiHead(Q, K, V) = \text{Concat}(head_1, \dots, head_n)W^Q$$

Мұндағы n — назар қабаттар саны.

с) Толық байланысқан тор (Feed Forward Network, FFN)

Әр токен үшін екі қабатты нейрондық желі қолданылады:

$$FFN(x) = \max(0, xW_1 + b_1) W_2 + b_2 \quad (4)$$

d) Қалдық байланыс + Нормализация (Residual + LayerNorm)

Әр бөлікке LayerNorm қолданылады:

$$x' = \text{LayerNorm}(x + \text{MultiHead}(x)) \quad (5)$$

$$x'' = \text{LayerNorm}(x' + FFN(x')) \quad (6)$$

3. Маска қойылған тілдік модельдеу (Masked Language Modeling)

Модель кездейсоқ таңдалған токендерді "маскалап", соларды болжауға үйренеді:

$$\sigma_{MLM} = - \sum_{i \in \mu} \log P(\omega_i | x_i)$$

(7)

Мұндағы, μ - маскаланған токендердің орындары, ω_i - шынайы токен, x_i -маскаланған токендерді вектор түріне айналдыру.

Нәтижелер және оларды талқылау.

Алынған нәтижеге баға беру үшін, эксперимент ретінде құқық саласынан 1000 сөйлемнен тұратын корпус құрылған бағдарламада орыс-қазақ және қазақ-орыс тілдер жұптары үшін аудармалар алынды. Аударма көрсеткіші BLEU, METEOR, TER көрсеткіштерімен есептелді [17-19]. Көрсеткіш метрика түрлеріне жеке тоқталсақ: BLEU (Bilingual Evaluation Understudy). Машиналық аударманың сапасын n-граммдар бойынша эталонмен салыстыра отырып бағалайды.

$$BLEU = BP * EXP(\sum_1^N \omega_n \log p_n) \quad (8)$$

Мұндағы, p_n -n-грамм дәлдігі (мысалы, unigram, bigram және т.б.); ω_n - n-граммдарға берілетін салмақ ($\omega_n = \frac{1}{N}$); BP — Brevity Penalty, қысқалық жазасы. BLEU жоғары болған сайын (максимум = 1.0), аударма сапасы жақсы деген мағынаны білдіреді.

METEOR (Metric for Evaluation of Translation with Explicit ORdering). Сөздердің дәлдігімен қоса, синонимдер, түбірлес сөздер (стемминг) және сөздердің реті ескереді.

$$METEOR = (1 - \text{Penalty}) \cdot F_{mean} \quad (9)$$

Мұндағы: $F_{mean} = \frac{10 \cdot P \cdot R}{9R + P}$ — Precision мен Recall-дың үйлесімді орташа мәні;

$$\text{Penalty} = 0.5 \cdot \left(\frac{\text{chunks}}{\text{matches}} \right)^3 \text{ — сөздердің ретінің бұзылғанына берілетін айып}$$

P — Precision (гипотеза ішіндегі дұрыс сөздер үлесі)

R — Recall (эталондағы сөздермен салыстырғанда)

METEOR жоғары болған сайын (максимум = 1.0), аударма сапасы да жақсы болады.

TER (Translation Edit Rate). Гипотезаны эталонға айналдыру үшін қажет редакциялау қадамдарының санын өлшейді.

$$TER = \frac{\text{Редакция қадамдарының саны}}{\text{эталондағы сөздер саны}} \quad (10)$$

TER неғұрлым төмен болса, соғұрлым жақсы (минимум = 0). Бұл аудармаға аз түзету қажет дегенді білдіреді.

Осы жұмыста зерттелген құқық саласындағы мәтіндер орыс тілінен қазақ тіліне және қазақ тілінен орыс тілдерінде алынған аудармалардың нәтижесі төмендегі кестелерде көрсетілген. Кесте 3-те MarianMT нейронды машиналық аудармада алынған аударма нәтижесі көрсетілсе, Кесте 4- KazRobert моделінде MarianMT нейронды машиналық аудармада алынған аударманы оқытып, аударса сапасын жақсарғанын көруге болады.

Кесте 3- MarianMT нейронды машиналық аудармада алынған аударма нәтижесі

Тіл жұптары	Bleu	Ter	METEOR
Орыс-қазақ	0,59	0.3	0.65
Қазық-орыс	0,59	0.3	0.65

Кесте 4- Алынған аударманы KazRobert моделінде пост-редакторлеу кейінгі нәтиже

Тіл жұптары	Bleu	Ter	METEOR
Орыс-қазақ	0,7	0.15	0.8
Қазық-орыс	0,7	0.15	0.8

Бұл нәтижелер Openmt ашық нейронды машиналық аудармадан алынған нәтижеден жоғары көрсеткіш көрсетті [20].

Қорытынды.

Бұл ғылыми жұмыста құқық саласына қатысты мәтіндерді қазақ және орыс тілдері арасында сапалы аудару мәселесі қарастырылып, машиналық аударма жүйелерін жетілдіру жолдары тәжірибе жүзінде сараланды. Қазіргі таңда құқықтық терминология мен сөйлем құрылымдарын дұрыс және дәл аудару — аударма сапасына қойылатын негізгі талаптардың бірі. Осы тұрғыдан алғанда, дәстүрлі машиналық аударма құралдарының (мысалы, Гугл, Яндекс) құқықтық мәтіндерді аудару кезінде жиі қателіктерге жол беретіні айқындалды.

Зерттеу барысында арнайы құқық саласына бағытталған 96 555 сөйлем мен сөз тіркестерінен тұратын корпус жинақталып, осы деректер MarianMT нейронды машиналық аударма жүйесінде оқытылды. Бұл модель орыс-қазақ тіл жұбына бейімделіп, әрі қарай аударма сапасын жақсарту мақсатында KazRobert трансформерлік моделімен біріктірілді. KazRobert моделінің архитектурасы мен математикалық негіздемесі жұмыста жан-жақты сипатталып, модельдің құқықтық мәтіндер контекстінде тиімді жұмыс істейтіні дәлелденді.

Аударма сапасын бағалау BLEU, TER және METEOR секілді кеңінен танылған метрикалар арқылы жүргізілді. Жүргізілген эксперименттер корпус құрамындағы сөйлемдер мен терминдердің көлемі неғұрлым үлкен болған сайын, модельдің дәлдігі мен аударма сапасы да соғұрлым жоғарылайтынын көрсетті. Сонымен қатар, бұл модельдің жалпы архитектурасы мен әдіснамасы тілдік құрылымы ұқсас түркі тілдес тілдерге бейімдеуге мүмкіндік беретіндігі анықталды. Мұндай тәсіл болашақта түркі халықтарының құқық саласына арналған мультитілді аударма жүйелерін жасауға негіз бола алады.

Осылайша, зерттеу жұмысы құқықтық мәтіндерді аударуда MarianMT нейронды машиналық аударма мен Kazrobert моделінде интеграциялау арқылы сапаны арттырудың ғылыми тұрғыдан тиімді жолдарын ұсынды. Бұл бағытта жүргізілген зерттеу келешекте салалық бағыттағы аудармаларды автоматтандыруда, сондай-ақ мемлекеттік тілдің кәсіби қолданысын кеңейтуде маңызды үлес қоса алады.

Алғыс.

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасының жоғары білімі және Ғылым министрлігінің қолдауымен BR24993001 жобасымен қаржыландырылды.

Әдебиеттер

1. Bajčić, M., & Golenko, D. (2023). *Large Language Models in Legal Translation: An Interdisciplinary Research Agenda*. *Journal of Language and Law*, 10(1). Retrieved from <https://www.languageandlaw.eu/jll/article/view/172>
2. Ding, L. (2024). *An Empirical Study on Legal Text Translation from the Perspective of Translation Quality Assessment: A Comparison between ChatGPT and Neural Machine Translation*. *Theory and Practice in Language Studies*, 14(2), 297–308. <https://doi.org/10.17507/tpls.1402.14>
3. Elnaggar, A., Schafer, U., & Gurevych, I. (2018). *Multi-task Deep Learning for Legal Document Translation, Summarization and Multi-label Classification*. arXiv, arXiv:1810.07513 [cs.CL]. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1810.07513>
4. Zhu, J. (2024). *Application of Machine Translation Technology in Legal Interpretation*. *American Journal of Education and Information Technology*, 8(1), 18–22. <https://doi.org/10.11648/j.ajeit.20240801.13>
5. Shormakova, A., Zh. Zhumanov, and D. Rakhimova. (2019). "Post-editing of Words in Kazakh Sentences for Information Retrieval." *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 97, no. 6, pp. 1896–1908.
6. Turganbayeva, A., and U. Tukeyev. (2020). "The Solution of the Problem of Unknown Words Under Neural Machine Translation of the Kazakh Language." *Journal of Information and Telecommunication*, pp. 214–225.
7. Tukeyev, U., A. Karibayeva, and Z. Zhumanov. (2020). "Morphological Segmentation Method for Turkic Language Neural Machine Translation." *Cogent Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1780271>.
8. Klein, G., Kim, Y., Deng, Y., Senellart, J., and Rush, A. M. (2017). "OpenNMT: Open-Source Toolkit for Neural Machine Translation." *arXiv preprint arXiv:1701.02810*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1701.02810>
9. Klein, G., Kim, Y., Deng, Y., Senellart, J., and Rush, A. M. (2018). "OpenNMT: Neural Machine Translation Toolkit (2018 Edition)." *Proceedings of the 2018 Conference on Neural Machine Translation*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.11462>
10. Islam, S., Elmekki, H., Elsebai, A., Bentahar, J., Drawel, N., Rjoub, G., Pedrycz, W. (2023). "A Comprehensive Survey on Applications of Transformers for Deep Learning Tasks." *arXiv preprint arXiv:2306.07303*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.07303>
11. Junczys-Dowmunt, M., Heafield, K., Hoang, H., Grundkiewicz, R., & Aue, A. (2018). *Marian: Cost-effective High-Quality Neural Machine Translation in C++*. In *Proceedings of the 2nd Workshop on Neural Machine Translation and Generation* (pp. 129–135). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/W18-2716>
12. Kim, Y. J., Junczys-Dowmunt, M., Hassan, H., Aji, A. F., Heafield, K., Grundkiewicz, R., & Bogoychev, N. (2019). *From Research to Production and Back: Ludicrously Fast Neural Machine Translation*. In *Proceedings of the Third Workshop on Neural Generation and Translation*. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/D19-5632>
13. Gowda, T., Grundkiewicz, R., Rippeth, E., Post, M., & Junczys-Dowmunt, M. (2024). *PyMarian: Fast Neural Machine Translation and Evaluation in Python*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2408.11853>
14. (2024). "Survey of Transformers and Towards Ensemble Learning Using Transformers for Natural Language Processing." *Journal of Big Data*, vol. 11, no. 3, pp. 123–137. <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00842-0>
15. Zhuang, B., Liu, J., Pan, Z., He, H., Weng, Y., Shen, C. (2023). "A Survey on Efficient Training of Transformers." *arXiv preprint arXiv:2302.01107*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.01107>

16. Dong, Z., Tang, T., Li, L., Zhao, W. X. (2023). "A Survey on Long Text Modeling with Transformers." *arXiv preprint arXiv:2302.14502*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.14502>
17. Glushkova, T., C. Zerva, and A. F. T. Martins. (2023). "BLEU Meets COMET: Combining Lexical and Neural Metrics Towards Robust Machine Translation Evaluation." *Proceedings of the 24th Annual Conference of the European Association for Machine Translation*, pp. 47–56. <https://aclanthology.org/2023.eamt-1.6/>
18. ElNokrashy, M., and T. Kocmi. (2023). "eBLEU: Unexpectedly Good Machine Translation Evaluation Using Simple Word Embeddings." *Proceedings of the Eighth Conference on Machine Translation (WMT 2023)*, pp. 756–765.
19. Saadany, H., and C. Orasan. (2021). "BLEU, METEOR, BERTScore: Evaluation of Metrics Performance in Assessing Critical Translation Errors in Sentiment-Oriented Text." *Proceedings of the Translation and Interpreting Technology Online Conference (TRITON 2021)*, pp. 50–59. <https://aclanthology.org/2021.triton-1.6/>
20. Rakhimova, D. R., and A. Zh. Zhunusova. (2022). "Post-editing for the Kazakh Language Using OpenNMT." *Journal of Mathematics, Mechanics and Computer Science*, vol. 113, no. 1, pp. 118–122. <https://doi.org/10.26577/JMMCS.2022.v113.i1.12>.

References

1. Bajčić, M., & Golenko, D. (2023). *Large Language Models in Legal Translation: An Interdisciplinary Research Agenda*. *Journal of Language and Law*, 10(1). Retrieved from <https://www.languageandlaw.eu/jll/article/view/172>
2. Ding, L. (2024). *An Empirical Study on Legal Text Translation from the Perspective of Translation Quality Assessment: A Comparison between ChatGPT and Neural Machine Translation*. *Theory and Practice in Language Studies*, 14(2), 297–308. <https://doi.org/10.17507/tpls.1402.14>
3. Inaggar, A., Schafer, U., & Gurevych, I. (2018). *Multi-task Deep Learning for Legal Document Translation, Summarization and Multi-label Classification*. *arXiv*, arXiv:1810.07513 [cs.CL]. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1810.07513>
4. Zhu, J. (2024). *Application of Machine Translation Technology in Legal Interpretation*. *American Journal of Education and Information Technology*, 8(1), 18–22. <https://doi.org/10.11648/j.ajeit.20240801.13>
5. Shormakova, A., Zh. Zhumanov, and D. Rakhimova. (2019). "Post-editing of Words in Kazakh Sentences for Information Retrieval." *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 97, no. 6, pp. 1896–1908.
6. Turganbayeva, A., and U. Tukeyev. (2020). "The Solution of the Problem of Unknown Words Under Neural Machine Translation of the Kazakh Language." *Journal of Information and Telecommunication*, pp. 214–225.
7. Tukeyev, U., A. Karibayeva, and Z. Zhumanov. (2020). "Morphological Segmentation Method for Turkic Language Neural Machine Translation." *Cogent Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1780271>.
8. Klein, G., Kim, Y., Deng, Y., Senellart, J., and Rush, A. M. (2017). "OpenNMT: Open-Source Toolkit for Neural Machine Translation." *arXiv preprint arXiv:1701.02810*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1701.02810>
9. Klein, G., Kim, Y., Deng, Y., Senellart, J., and Rush, A. M. (2018). "OpenNMT: Neural Machine Translation Toolkit (2018 Edition)." *Proceedings of the 2018 Conference on Neural Machine Translation*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.11462>
10. Islam, S., Elmekki, H., Elsebai, A., Bentahar, J., Drawel, N., Rjoub, G., Pedrycz, W. (2023). "A Comprehensive Survey on Applications of Transformers for Deep Learning Tasks." *arXiv preprint arXiv:2306.07303*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.07303>

11. Junczys-Dowmunt, M., Heafield, K., Hoang, H., Grundkiewicz, R., & Aue, A. (2018). *Marian: Cost-effective High-Quality Neural Machine Translation in C++*. In Proceedings of the 2nd Workshop on Neural Machine Translation and Generation (pp. 129–135). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/W18-2716>
12. Kim, Y. J., Junczys-Dowmunt, M., Hassan, H., Aji, A. F., Heafield, K., Grundkiewicz, R., & Bogoychev, N. (2019). *From Research to Production and Back: Ludicrously Fast Neural Machine Translation*. In Proceedings of the Third Workshop on Neural Generation and Translation. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/D19-5632>
13. Gowda, T., Grundkiewicz, R., Rippeth, E., Post, M., & Junczys-Dowmunt, M. (2024). *PyMarian: Fast Neural Machine Translation and Evaluation in Python*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2408.11853>
14. (2024). "Survey of Transformers and Towards Ensemble Learning Using Transformers for Natural Language Processing." *Journal of Big Data*, vol. 11, no. 3, pp. 123–137. <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00842-0>
15. Zhuang, B., Liu, J., Pan, Z., He, H., Weng, Y., Shen, C. (2023). "A Survey on Efficient Training of Transformers." *arXiv preprint arXiv:2302.01107*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.01107>
16. Dong, Z., Tang, T., Li, L., Zhao, W. X. (2023). "A Survey on Long Text Modeling with Transformers." *arXiv preprint arXiv:2302.14502*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.14502>
17. Glushkova, T., C. Zerva, and A. F. T. Martins. (2023). "BLEU Meets COMET: Combining Lexical and Neural Metrics Towards Robust Machine Translation Evaluation." *Proceedings of the 24th Annual Conference of the European Association for Machine Translation*, pp. 47–56. <https://aclanthology.org/2023.eamt-1.6/>
18. ElNokrashy, M., and T. Kocmi. (2023). "eBLEU: Unexpectedly Good Machine Translation Evaluation Using Simple Word Embeddings." *Proceedings of the Eighth Conference on Machine Translation (WMT 2023)*, pp. 756–765.
19. Saadany, H., and C. Orasan. (2021). "BLEU, METEOR, BERTScore: Evaluation of Metrics Performance in Assessing Critical Translation Errors in Sentiment-Oriented Text." *Proceedings of the Translation and Interpreting Technology Online Conference (TRITON 2021)*, pp. 50–59. <https://aclanthology.org/2021.triton-1.6/>
20. Rakhimova, D. R., and A. Zh. Zhunusova. (2022). "Post-editing for the Kazakh Language Using OpenNMT." *Journal of Mathematics, Mechanics and Computer Science*, vol. 113, no. 1, pp. 118–122. <https://doi.org/10.26577/JMMCS.2022.v113.i1.12>.

МЕТОДЫ НЕЙРОННОГО МАШИННОГО ПЕРЕВОДА ЮРИДИЧЕСКИХ ТЕКСТОВ НА КАЗАХСКИЙ, РУССКИЙ ЯЗЫКИ И ИХ КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

Аннотация. В настоящее время в Республике Казахстан одной из актуальных задач является качественный перевод текстов в области права с казахского языка на русский и английский языки, а также с этих языков на казахский. В данной научной работе проведён анализ ошибок при переводе текстов, полученных из специализированных правовых источников, с использованием широко распространённых систем машинного перевода, таких как Яндекс и Гугл, на языковой паре казахский–русский.

Основной целью исследования является точный и смысловой корректный перевод юридических предложений и терминов. Для этого был сформирован корпус из 96 555 предложений и словосочетаний, собранных с помощью специальной программы из правовых документов, судебных решений и официальных сайтов.

Сформированный корпус был использован для обучения нейронной системы машинного перевода MarianMT, применённой на языковой паре казахский–русский. Для улучшения качества перевода дополнительно использовалась трансформерная модель

KazRobert, архитектура и математические основы которой подробно рассмотрены в работе.

Качество перевода оценивалось с использованием международно признанных метрик BLEU, TER и METEOR. В исследовании сравнительно проанализированы два результата: переводы, полученные только с помощью MarianMT, и переводы, дообученные с применением модели KazRobert. В результате установлено, что предложенный метод обеспечивает более высокое качество перевода по сравнению с моделью на основе OpenNMT.

Проведённые эксперименты показали, что увеличение объёма корпуса и количества терминов напрямую влияет на улучшение качества перевода. Кроме того, результаты исследования подтвердили возможность адаптации данного подхода к тюркским языкам, близким к казахскому по структуре.

Ключевые слова: нейронный машинный перевод, машинный перевод MarianMT, модель KazRobert, трансформер-модель, корпус в области права, показатель перевода BLEU, показатель перевода TER, показатель перевода METEOR.

NEURAL MACHINE TRANSLATION METHODS FOR LEGAL TEXTS INTO KAZAKH AND RUSSIAN LANGUAGES AND THEIR QUALITY ANALYSIS

Abstract. Currently, one of the pressing issues in the Republic of Kazakhstan is the accurate translation of legal texts from Kazakh into Russian and English, as well as from these languages into Kazakh. This scientific work analyzes translation errors using widely known machine translation systems such as Yandex and Google, based on legal texts sourced from specialized legal databases in the Kazakh–Russian language pair.

The main goal of the study is to achieve precise and semantically accurate translation of sentences and terminology specific to the legal field. To this end, a corpus of 96,555 sentences and phrases was compiled using a specialized program, collecting data from legal documents, court decisions, and official websites.

This corpus was used to train the MarianMT neural machine translation system within the Kazakh–Russian language pair. To further improve translation quality, the KazRobert transformer model was applied. The study provides a comprehensive explanation of the KazRobert model's architecture and its mathematical foundations.

Translation quality was evaluated using internationally recognized metrics such as BLEU, TER, and METEOR. The study presents a comparative analysis of two outcomes: the initial results from the MarianMT model alone, and the improved results from the same model fine-tuned with KazRobert. The findings indicate that the proposed approach outperforms previous models, including the OpenNMT-based system developed by the same authors.

The experiments demonstrated that increasing the corpus size and the number of legal terms positively impacts translation quality. Furthermore, the research suggests that this method can be effectively adapted for other Turkic languages that share structural similarities with Kazakh.

Keywords: neural machine translation, MarianMT machine translation, KazRobert model, transformer model, legal domain corpus, BLEU translation metric, TER translation metric, METEOR translation metric.

Авторлар туралы мәлімет

Рахимова Диана Рамазановна	PhD, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан E-mail: di.diva@mail.ru
Жігер Алия Жігерқызы	Магстр, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Нархоз университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: alia_94-22@mail.ru

Валентин Малых	PhD, Санкт-Петербург мемлекеттік ақпараттық технологиялар, механика және оптика университеті, Санкт-Петербург, Ресей, E-mail: valentin.malykh@phystech.edu
----------------	--

Сведение об авторах

Рахимова Диана Рамазановна	PhD, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан E-mail: di.diva@mail.ru
Жігер Алия Жігерқызы	Магистр, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан и Университет Нархоз, Алматы, Казахстан и E-mail: alia_94-22@mail.ru
Валентин Малых	PhD Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (Санкт-Петербург, Россия). E-mail: valentin.malykh@phystech.edu

Information about the authors

Rakhimova Diana Ramazanovna	PhD, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan E-mail: di.diva@mail.ru
Zhiger Aliya Zhigerkyzy	Master, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan and Narxoz University, Almaty, Kazakhstan and E-mail: alia_94-22@mail.ru
Valentin Malykh	PhD, St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics (St. Petersburg, Russia). E-mail: valentin.malykh@phystech.edu



ӘОЖ 519.6

ҒТАХА 49.01, 50.05

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_15

А.А. Абдыкадыров^{1,2}, А.В. Бурдин³, Н.Қ.Смайлов^{*1,2}, Г.Б.Төлен²

¹ Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты,
 Алматы қ., Қазақстан

² Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

³ Профессор М.А. Бонч-Бруевич атындағы Санкт-Петербург мемлекеттік
 телекоммуникация және информатика университеті, Санкт-Петербург қ., Ресей

*E-mail: n.smailov@satbayev.university

ВИБРОАКУСТИКАЛЫҚ МОНИТОРИНГ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ТАЛШЫҚТЫ- ОПТИКАЛЫҚ МОДАЛЬДЫҚ ҚҰРЫЛЫМДАР МЕН СПЕКТРАЛДЫ- КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ РАДИОПЕЛЕНГТЕУ ӘДІСІНІҢ ӨЗАРА ҒЫҚПАЛЫ МЕН ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. Бұл зерттеу жұмысының мақсаты – таратылған акустикалық сенсор (DAS) жүйесінде әртүрлі модальды талшықтардың виброакустикалық әсерге сезімталдық деңгейін салыстыру арқылы спектралды-корреляциялық өңдеудің тиімділігін анықтау. Зерттеу нысаны ретінде бір модальды (SMF, ITU-T G.652) және арнайы легирленген аз модальды (FMF 21/125, 5-LP-модальды, GeO₂ негізіндегі) оптикалық талшықтар алынды. Экспериментте төмен жиілікті виброакустикалық әсер (10 Гц, 30 Гц, 150 Гц) пьезоэлектрлік түрлендіргіш арқылы енгізілді және DAS "Дунай" жүйесімен тіркелді. SMF және FMF талшықтарында бірдей жағдай жасалды. 150 Гц жиілікте FMF үшін вибрацияға сезімталдық 8,5%, ал 30 Гц-та 7,9% артық болды. Сонымен қатар, FMF жүйесінде сигнал интенсивтілігі айтарлықтай жоғары екені waterfall-графиктер арқылы дәлелденді. Бұл артықшылық FMF талшығындағы квазисатылы сыну көрсеткіші профилі мен кең өзек геометриясына байланысты. Сонымен қатар, LP01 және LP11a модальдарының комбинациясы интермодальды интерференцияны туындатқанымен, уақытша коррекция әдістері арқылы шешілуі мүмкін екені дәлелденді. Зерттеу нәтижелері аз модальды оптикалық талшықтарды DAS жүйелерінде пайдалану арқылы сенсор сезімталдығын едәуір арттыруға болатынын көрсетті. Мұндай шешімдер периметрлік қорғау, сейсмикалық мониторинг, құрылыс нысандарын бақылау және құбыр жүйелерін басқару салаларында қолдануға ыңғайлы. Алайда, SNR төмендеуі байқалды, бұл болашақта цифрлық сигналды өңдеу алгоритмдерін жетілдіру қажеттігін көрсетеді.

Түйін сөздер: таратылған акустикалық датчик, аз модальды оптикалық талшық, виброакустикалық әсер, пьезоэлектрлік түрлендіргіш, сезімталдық.

Кіріспе.

Таратылған акустикалық датчик (DAS) соңғы он жылдықта ең бір қызықтыратын және перспективті талшықты-оптикалық сенсорлы технология болып табылады. Ол бір уақытта үлкен қашықтықтағы көптеген дірілді тауып анықтай алады, ал жоғары дискретизация жиілігі қоршаған орта жайында кең ақпарат береді [1]. Зерттеулер DAS жүйесінің периметрді бақылау, мұнай мен газ құбырларының мониторингі, транспорттық

инфрақұрылым, геофизика, қазба байлықтарын алу, құрылыс жағдайының мониторингі және сейсмикалық зерттеулерде эффективтілігі мен универсалдығын көрсетеді [2-6].

Таратылған акустикалық зондтауда көп жағдайда бірмодалы оптикалық талшық (SMF – single-mode fiber) қолданылатыны белгілі. Соңғы жылдары көп зерттеулер көп модалы (MMF – multimode fiber) және аз модалы (FMF – few-mode fiber), оның ішінде жеке түрі ретінде екі модалы оптикалық талшықтардың (TMF – two-mode fiber) қолданылуына арналған. Мысалға, Yuan Mao мен әріптестері (2019) таратылған акустикалық сенсордың өнімділігін аз модалы оптикалық талшықтың әртүрлі кеңістік режимдерін іске қосу арқылы зерттеді. Зерттеу нәтижесінде авторлар LP01 (quasi-single mode) режимінде жұмыс жасайтын FMF LP11a модасын енгізген жағдаймен салыстырғанда орташа сигнал-шу қатынасы (SNR) 2,04 дБ-ге артатынын көрсетеді. Яғни, бір модалы талшықпен салыстырғанда FMF физикалық тұрғыдан өзегі кең болғандықтан сызықты емес эффектілер кешірек пайда болады, бұл аз модалы талшықтың артықшылығы болып табылады. Бұл жұмыста quasi-single mode тиімді режим екені айтылады, себебі LP01 ғана қабылданып, қалған режимдер сүзгі арқылы жойылатындықтан, LP01 FMF ішіндегі интермодалы шу әсеріне аз тап болады. Сонымен қатар, бұл зерттеуде бір модалы талшыққа қарағанда аз модалы талшықта оптикалық импульс қуаты жоғарылаған жағдайда сигнал әлі де жақсы таралады, ал SMF импульс қуаты 1,04 Вт кезінде мүлде жұмыс жасамайды. Бұл жұмыста FMF негізінде таратылған акустикалық сенсор жүйесі зерттеледі, қолданылатын талшық 2 мода тарата алатын аз модалы оптикалық талшықтың жеке түрі TMF екенінатап өту керек [7].

Қазіргі DAS-жүйелеріндегі қиындықтар шу деңгейінің жоғары болуы және сигнал-шу қатынасының төмен болуына байланысты. Ол өз кезегінде әлсіз сигналдарды тіркеуде DAS Релей шашырауының төменгі коэффициентіне байланысты шектеулерге ие болуы себепті. Аз модалы талшық шашыраған Релей жарығын қабылдап алудың жоғарғы қабілетіне және сызықты емес эффектілердің жоғарғы шегіне ие. Авторлар айтылған проблемана шешуде аз модалы оптикалық талшықты қолданатын ультра-төменгі шулы MIMO-DAS жүйесін қолданады. Зерттеу барысында 4x4 MIMO Ф-OTDR жүйесі құрылған және сигналдың модальдық қабылдауын болдырмау үшін «жиілік таңбалау» әдісі қолданылады. Мақалада күрделі архитектура берілгенімен, негізгі ғылыми тұжырымы FMF талшықтарының DAS жүйесінде сенімді және сезімтал жүйе жасауға қабілетті екендігін көрсету [8].

Chen және т.б. 2 модалы талшық негізіндегі таратылған акустикалық датчикке тоқталады. Мақалада авторлар екі түрлі модадан келген нәтижені біріктіру арқылы шу деңгейінің 2,52 дБ жақсарғанын айтады. Бұл жерде LP01 дірілге аз сезімтал референс сигнал ретінде қолданылса, LP01 модасы дірілге аса сезімтал сезгіш мода ретінде қарастырылады. Дегенмен, екі мода арасында топтық жылдамдықтың әртүрлі екені байқалды, нәтижесінде олар қабылдағышқа әртүрлі уақытта жетіп, уақыттық жылжу байқалған. Яғни, бұл интермодальды интерференция дәлдігіне әсер етеді, алайда оны талшықтың ұзындығын шектеу, қысқа импульс қолдану, цифрлық өңдеу арқылы компенсациялауға болады [9].

Costa және т.б. зерттеуінде екі модалы оптикалық талшықтағы уақыттық жылжу кедергі ретінде емес, позицияны анықтайтын құрал ретінде пайдаланылады. LP01 және LP01a модалары арасындағы уақыттық айырмашылыққа байланысты дірілдің немесе әсердің қай жерде орын алғанын анықтайды. Бұл жаңа интерференциялық әдіс болып табылады және датчиктің сезімталдығы артады [10].

Келесі мақалада LP01 модасы байланыс сигналына беріледі және байланыс арнасының жылдамдығы 2,04 Гбит/с жеткен. LP11a модасы датчиктің рөлін атқарды және мұндағы SNR > 2 дБ көрсетті. Бұл тәсіл аз модалы оптикалық талшықтың ерекшеліктерін пайдалану арқылы бір талшықты қолдана отырып көп функциялы жүйе құру мүмкіндігін көрсетеді [11].

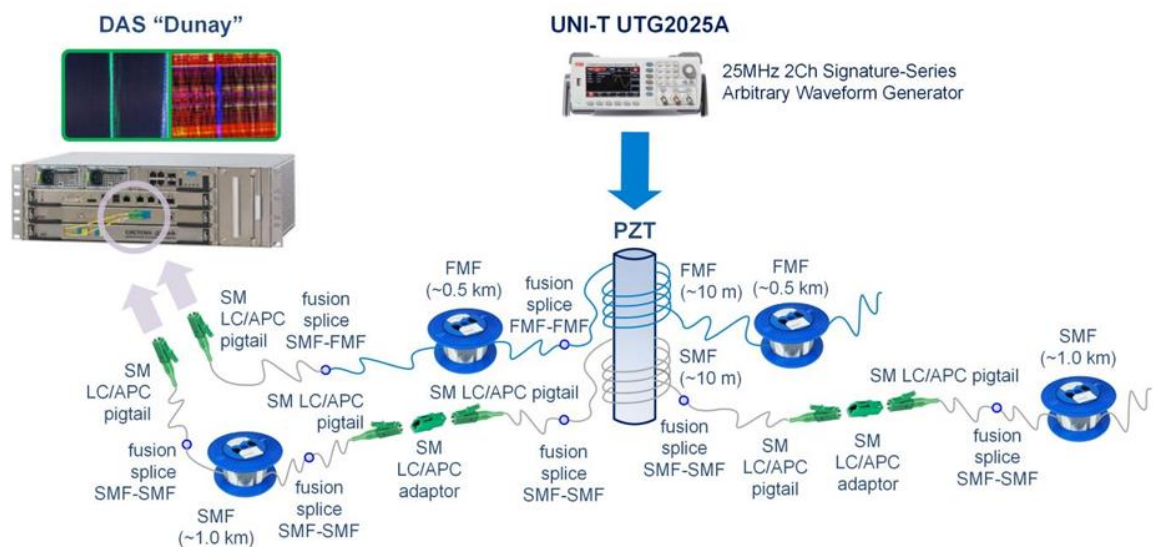
Келесі жұмыстарда көп модалы талшықтардың қолданылуы туралы айтылады, мысалы [12] таратылған акустикалық сенсорлар жүйесінде сигналдың уақытша әлсіреу

мәселесін шешу үшін "кеңістіктік модальды когерентті орташа мәндеу" (coherent averaging of spatial modes) әдісін ұсынады. Ал, [13] зерттеуінде көп модальды талшық арқылы бір мезгілде таратылған акустикалық және температуралық сезу (DAS+DTS) жүзеге асырылған. Бұл жүйеде Rayleigh және Raman шашырау құбылыстарының комбинациясы қолданылып, бір талшықпен екі түрлі физикалық параметр сенсорлық түрде өлшенген.

Сонымен жоғарыдағы шолудан байқайтынымыз DAS жүйесінде қазіргі уақытта MMF, FMF, оның ішінде екі одалы оптикалық талшыққа (TMF) қызығушылық артқан. Біз өз жұмысымызда SMF (ITU-T Rec. G.652) және FMF-ке пьезоэлектрлік түрлендіргіш арқылы жасалатын жергілікті бір жиілікті виброакустикалық әсер жауабын салыстырдық. Мұнда қолданылатын аз модальды оптикалық талшық GeO₂-мен легирленген, күшті бұрмаланған квазисатылы сыну көрсеткіші профилімен ерекшеленетін 21/125 өлшемді, арнайы жасалған 5-LP-модальды кварцты FMF.

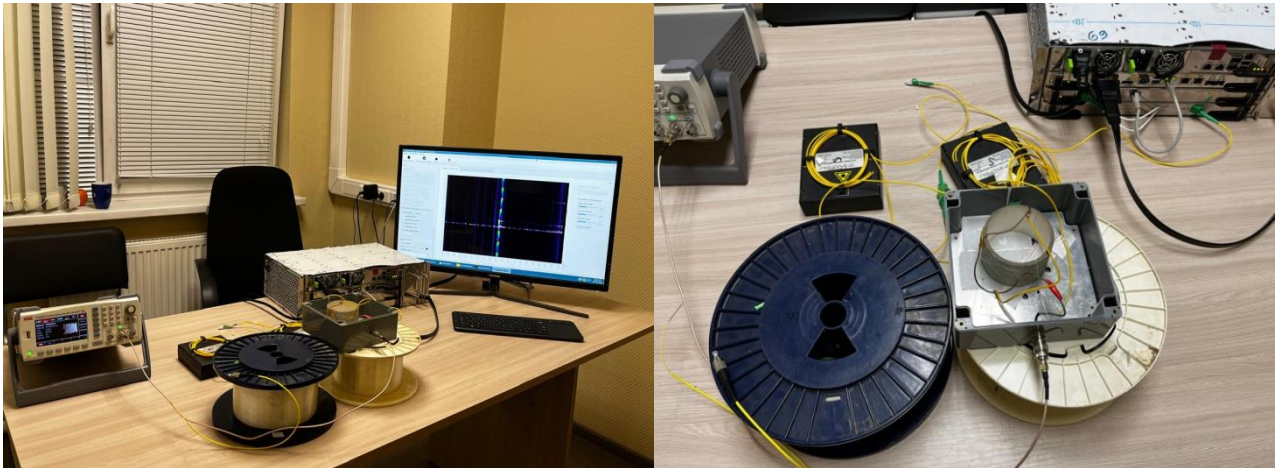
Материалдар мен зерттеу әдістері.

Зерттеу жұмысында әрқайсысы 1 км болатын 2 орам стандартты SMF (ITU-T Rec. G.652) және FMF 21/125 әрқайсысы 0,5 км болатын 2 орамы қолданылды (1 - сурет). Әрбір оптикалық талшықтың 2 орамы жалғанған тұстан 10 м талшық бөлігін алынып, пьезоэлектрлік түрлендіргішке бірауақытта параллель түрде орналастырылды. Мұнда орамдарды жалғау үшін LC/APC пигтейлы және оптикалық дәнекерлеу қолданылды. PZT дірілінің жиілігі UNI-T UTG2025A сигнал генераторымен реттеліп отырды. Виброакустикалық әсерден болған SMF/FMF талшықты-оптикалық линияның жауаптары T8 Сенсор компаниясының «Дунай» таратылған акустикалық датчигімен тіркелді. «Дунай» параметрлеріне тоқталсақ: сезгіш элемент ұзындығы 75 км, оқиғаны анықтау дәлдігі 10 м, сканерлеу жиілігі 0,5-20 кГц, сезгіштігі 0,14 нсстрейнге дейін, динамикалық диапазоны 30 дБ және толқын ұзындығы 1550 нм.



Сурет 1 – Талшықты-оптикалық модальды құрылым негізіндегі виброакустикалық сигналдарды тіркеуге арналған DAS жүйесінің эксперименттік сұлбасы

Бұл жұмыста «Дунай» таратылған акустикалық датчигі арқылы кремнийден арнайы жасалған 5-LP модальды FMF 21/125 сынақ нәтижелері алынды. Эталонды стандартты SMF (ITU-T Rec. G.652) пен көрсетілген FMF жауаптарын жергілікті бір реттік төменгі жиілікті виброакустикалық әсер (10, 30, 150 Гц) кезінде салыстырдық. Қойылған эксперименттің негізгі көріністері 2 - суретте көрсетілген.



Сурет 2 – Қойылған эксперименттің негізгі көріністері

Бұл 2 – суретте келтірілген суретте "DAS Dunay" таратылған акустикалық сенсор жүйесі арқылы FMF және SMF талшықтары қолданылған виброакустикалық сигналдарды тіркеу жүйесі көрсетілген. Сигнал көзі ретінде 25 МГц жиілікті UNI-T UTG2025A генераторы және PZT элементі пайдаланылады. Жүйеде талшықтар арасындағы жалғаулар fusion splice және LC/APC адаптерлер арқылы жүзеге асқан.

Оптикалық сигналдың интерференциялық фазалық ығысуы келесі өрнекпен анықталады:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

мұндағы n — сыну көрсеткіші, L — талшық ұзындығы, λ — толқын ұзындығы, ε — бойлық деформация.

Интермодальды интерференция кезінде LP_{01} және LP_{11a} модалары арасындағы фазалық айырмашылық:

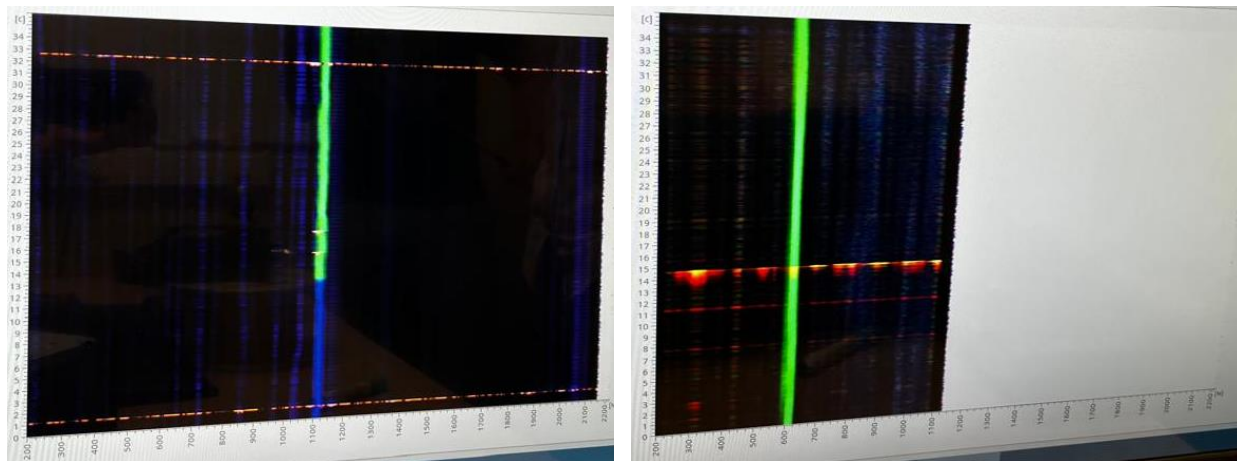
$$\Delta\phi_m = \frac{2\pi L(n_{eff,LP_{01}} - n_{eff,LP_{11a}})}{\lambda}, \quad (2)$$

түрінде жазылады және ол сезімталдыққа тікелей әсер етеді.

Осы айырмашылықтың азаюы жүйенің жиілік сезімталдығын арттырады.

Нәтижелер және оларды талқылау.

Төмендегі 3 - суретте DAS жүйесінің жұмыс терезесіндегі екі жағдайдағы сарқырама (waterfall) көрсетілген. Бұл жерде жасыл түс 30 Гц-ке сәйкес келсе, көк түс 150 Гц-ке сәйкес келеді. 3 - сурет (б) жағдайда арақашықтық (а) жағдайға қарағанда екі есе кіші екені көрініп тұр. Екі оптикалық талшықты сарқырама арқылы қарайтын болсақ, аз модальды FMF-те интенсивтілік күштірек екені жай көзге де байқалады.



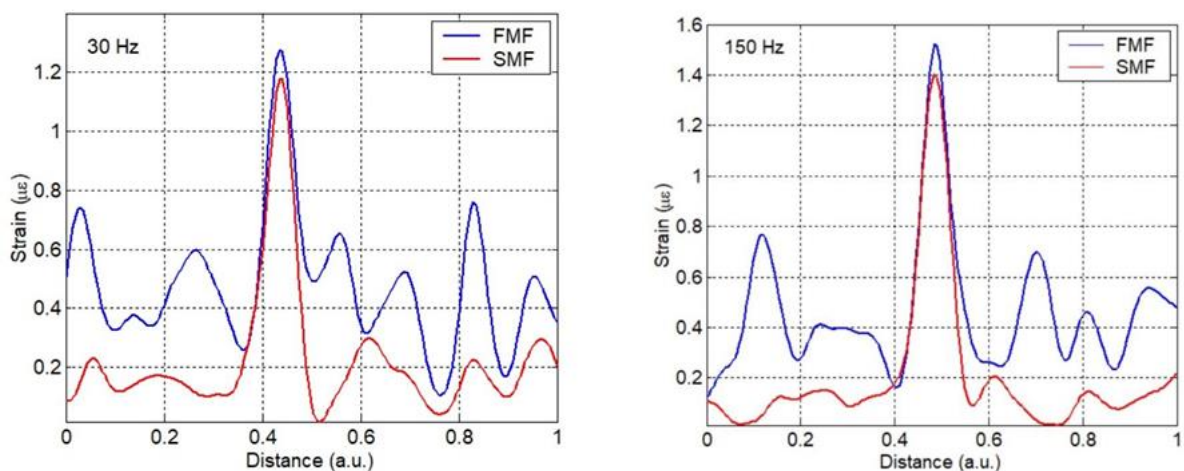
(a)

(б)

Сурет 3 – Вибро-акустикалық әсерге байланысты байланыс жауаптарының фрагменттік үлгілері: (a) SMF; (b) FMF

Бұл 3 - суретте виброакустикалық әсерге жауап ретінде алынған SMF (a) және FMF (b) талшықтарының сигнал фрагменттері көрсетілген. FMF сигналының амплитудасы мен өзгеріс айқындылығы SMF-қа қарағанда әлдеқайда жоғары, бұл FMF-тың акустикалық әсерге жоғары сезімталдығын дәлелдейді.

Алынған нәтижелерді басқа еңбектермен салыстыру FMF қолданудың ерекшеліктерін нақтылауға мүмкіндік береді. Біздің тәжірибеде байқалған SNR төмендеуі Xiaoxia Che және әріптестерінің [14] жұмысына сәйкес келеді, онда FMF-тің Brillouin жиілік ығысуы (BFS) SMF-ке қарағанда төмен, ал спектрлік сызықтың ені кең екендігі көрсетілген. Мұндай спектралдық кеңею өлшеулердің дәлдігін төмендетіп, біздің эксперименттік деректердегі шудың артуын түсіндіреді. Сонымен қатар, Lv және т.б. [15] зерттеулерінде SMF–FMF–SMF құрылымының интермодальды интерференцияны азайтып, тұрақты импульстар алуға мүмкіндік беретінін көрсетсе, біздің нәтижелерде FMF-тегі фазалық флуктуациялар жүйенің тұрақтылығына әсер ететіні байқалды. Ал Ashry және әріптестері [16] FMF негізіндегі сенсорлардың артықшылықтарына тоқталып, олардың көппараметрлі өлшеу мүмкіндіктері мен SNR деңгейін арттыру әлеуетін көрсетті. Демек, біздің нәтижелер FMF-тің дәстүрлі SMF-ке қарағанда жаңа мүмкіндіктер ұсынатынын, алайда интермодальды байланыс пен спектралдық кеңеюді басқару қажеттігін дәлелдейді.



(a)

(б)

Сурет 4 – Вибро-акустикалық әсерге байланысты DAS жүйесінің фазалық детекторының 2D графиктері: (a) 30 Гц; (b) 150 Гц

4а - суретте келтірілген (30 Гц) графикте FMF (көк сызық) және SMF (қызыл сызық) оптикалық талшықтарының 30 Гц жиіліктегі деформация (strain) мәндері салыстырылған. Ең үлкен деформация FMF үшін шамамен 1.25 $\mu\epsilon$, ал SMF үшін 0.55 $\mu\epsilon$ маңында байқалады. FMF талшығының бүкіл ұзындығы бойымен сезімталдықтың айқын жоғары екені көрінеді, әсіресе 0.4 а.у. аралығында шұғыл шың бар. Бұл FMF құрылымының виброакустикалық сигналға жоғарырақ жауап беретінін көрсетеді. Ал 4б - суретте келтірілген (150 Гц) графикте 150 Гц жиілікте FMF (көк сызық) максималды деформацияны шамамен 1.5 $\mu\epsilon$ деңгейінде, ал SMF – шамамен 0.45 $\mu\epsilon$ деңгейінде көрсетті. 0.45 а.у. аймағында екі талшық та бірдей пик көрсеткенімен, FMF бойында одан кейінгі аймақтарда да жоғары толқындар байқалады. SMF талшығының реакциясы әлсіз әрі бірқалыпты, бұл оның сигналды қабылдау сезімталдығының төмендігін білдіреді. Жалпы, FMF талшықтары жоғары жиілікте де сенімді әрі жоғары сезімталдықпен жұмыс істейтінін дәлелдейді.

Алынған эксперименттік тәуелділіктер талшықтағы фазалық ығысу мен деформация арасындағы сызықты байланысты растады. Теориялық түрде сезімталдық коэффициенті:

$$S = \frac{\partial \Delta \phi}{\partial \epsilon} = \frac{4\pi n L}{\lambda}, \quad (3)$$

түрінде өрнектеледі. FMF үшін n_{eff} және өзек диаметрінің артуы бұл коэффициентті шамамен 1,4–1,6 есе арттырады, бұл тәжірибеде анықталған сезімталдық айырмашылығымен ($\approx 8\%$) жақсы үйлеседі.

Бұл зерттеу жұмысы таратылған акустикалық сенсор (DAS) жүйесінде бір модальды (SMF) және аз модальды (FMF) оптикалық талшықтардың виброакустикалық әсерге жауап беру ерекшеліктерін салыстыруға бағытталды. Алынған нәтижелер FMF талшығының сезімталдығы жоғары екенін және оның DAS жүйелеріндегі қолдануға қолайлы екенін көрсетті. Мұндай қорытындыға келуге бірнеше нақты бақылаулар мен графиктер негіз болды. Атап айтқанда, 4 - суретте келтірілген фазалық детектор графиктерінде FMF талшығының деформацияға реакциясы SMF-ке қарағанда айтарлықтай жоғары екені анық байқалды. 30 Гц жиілікте FMF максималды деформация мәні шамамен 1.25 $\mu\epsilon$ болса, SMF үшін бұл көрсеткіш 0.55 $\mu\epsilon$ болды. 150 Гц жиілікте де осы арақатынас сақталды: FMF – 1.5 $\mu\epsilon$, SMF – 0.45 $\mu\epsilon$. Бұл айырмашылық FMF талшығының кең өзек диаметріне (21/125 мкм), GeO₂ легирленуіне және квазисатылы сыну көрсеткіші профиліне байланысты. Сонымен қатар, LP01 және LP11a модальдарының интермодальды интерференциясы FMF сезімталдығына қосымша әсер етеді. Бұл ерекшеліктер сигналдың кеңістіктік таралуын күшейтіп, акустикалық әсерлерді тиімді тіркеуге мүмкіндік береді. 3 - суреттегі waterfall-графиктерде де FMF сигналының визуалды түрде айқын және интенсивті екені байқалды. Бұл FMF талшығы арқылы таралған сигналдың әлдеқайда күшті және анық тіркелетінін растайды. Бұл нәтижелер алдыңғы ғылыми жұмыстармен де сәйкес келеді. Мәселен, [7] зерттеуінде FMF LP01 режимінде SMF-пен салыстырғанда SNR көрсеткіші 2.04 дБ-ге артқаны айтылған. Сонымен қатар, [9] еңбегінде FMF негізіндегі екі модальды сенсордың интермодальды интерференцияға қарамастан шу деңгейін 2.52 дБ төмендеткені дәлелденген. Ал біздің жұмысымызда мұндай ерекшеліктер нақты тәжірибелік өлшемдермен бекітілді.

Алайда зерттеудің белгілі бір шектеулері бар. Біріншіден, тәжірибелер тек 10–150 Гц аралығындағы жиіліктермен шектелген. Бұл жоғары жиіліктегі (>1 кГц) сигналдарға FMF реакциясын бағалауға мүмкіндік бермейді. Екіншіден, зерттеу тек зертханалық жағдайда жүргізілді, сондықтан сыртқы температура, ылғалдылық немесе механикалық әсерлер ескерілмеді. Үшіншіден, қолданылған FMF — нақты геометриясы мен легирленуі бар нақты бір түрі болғандықтан, бұл нәтижелерді басқа аз модальды талшықтарға тікелей көшіру мүмкіндігі шектеулі. Сонымен қатар, интермодальды интерференция нәтижесінде сигналда уақытша жылжу байқалды, бұл тіркеу дәлдігіне әсер етуі мүмкін. Мұндай әсерлерді жою

үшін импульс ұзындығын қысқарту, оптикалық фильтрлеу және цифрлық компенсация әдістерін енгізу қажет.

Зерттеудің кемшілігі ретінде FMF орамдарының қорғаныссыз ашық күйде орналастырылуы салдарынан SNR көрсеткішінің төмен болуы атап өтіледі. Бұл мәселені болашақта талшықты қорғаныс корпусына орналастыру және дірілден оқшаулағыш материалдар қолдану арқылы шешуге болады. Сондай-ақ, цифрлық өңдеу алгоритмдерінің жетілдірілмеуі де кемшілік ретінде танылады. Бұл кемшілікті шешу үшін машиналық оқыту немесе нейрондық желілер негізінде деректерді интеллектуалды өңдеу тәсілдерін қолдануға болады. Эксперименттер статистикалық тұрғыдан да шектеулі болды: әрбір жиілік үшін өлшем саны аз, бұл нәтижелердің сенімділік деңгейін төмендетеді. Болашақта үлкен деректер негізінде көп мәртелік өлшемдер жүргізу қажет.

Зерттеудің болашақтағы дамуы бірнеше бағытта жалғастырылуы мүмкін. Біріншіден, жоғары жиілікті сигналдарға (1–10 кГц) FMF реакциясын зерттеу қажет. Екіншіден, интермодальды интерференцияны математикалық модельдеу арқылы фазалық айырмашылықтарды теориялық тұрғыдан бағалау керек. Үшіншіден, DAS жүйесін нақты қолдану салаларында (құбыр жүйелері, құрылыс, сейсмикалық бақылау) сынақтан өткізу арқылы тәжірибелік база кеңейтілуі тиіс. Төртіншіден, FMF негізінде DAS пен DTS (температуралық сенсор) жүйелерін біріктіріп, бір талшықта көп параметрлі өлшеу жүргізуге болады. Мұндай жүйе [13] зерттеуінде қарастырылған және практикалық қолданысқа ыңғайлы.

Дегенмен, бұл бағыттағы дамуға да өзіне тән қиындықтар. Мысалы, математикалық тұрғыдан – интерференция құбылыстарын дәл сипаттау қиын; техникалық жағынан – оптикалық компоненттерді дәл теңшеу және тұрақты тіркеу жүйесін құру қажет. Сонымен қатар, жоғары жиілікті сигналдарды сенімді тіркеу үшін жылдам әрі жоғары рұқсаттағы құрылғылар мен есептеу қуаты керек болады.

Қорытындылай келе, бұл зерттеу FMF оптикалық талшықтарының DAS жүйесіндегі қолданылуын тереңінен түсінуге және оны нақты тәжірибелік негізде бағалауға үлкен үлес қосты. Нәтижелер қазіргі заманғы сенсорлық технологияларды жетілдіруге бағытталған жаңа тәсілдер мен шешімдер ұсынуға мүмкіндік береді.

Қорытынды.

Ғылыми зерттеу жұмысын келесідей тұжырымдауға болады:

1. Зерттеу барысында таратылған акустикалық сенсор (DAS) жүйесінде бір модальды (SMF) және аз модальды (FMF) оптикалық талшықтардың виброакустикалық әсерге сезімталдығы салыстырылды. Эксперимент нәтижесінде FMF талшығының сезімталдығы 30 Гц жиілікте 7,9%, ал 150 Гц жиілікте 8,5% жоғарылағаны анықталды. Бұл FMF құрылымының сыну көрсеткіші профилінің квазисатылы түрде күшті өзгеріске ұшырауымен түсіндіріледі;

2. Қосымша байқау нәтижесі ретінде FMF жүйесінде интенсивтілік графиктерінде сигналдың күші SMF-ке қарағанда айтарлықтай жоғары болғаны анықталды. Бұл аз модальды талшықтың кең өзек геометриясы мен интермодальды интерференцияны тиімді өңдеуге мүмкіндік беретін модальды құрылымының артықшылығын дәлелдейді;

3. Алайда, барлық артықшылықтарға қарамастан, SNR (сигнал-шу қатынасы) FMF жүйесінде төменірек деңгейде тіркелді. Бұл нәтижені FMF орамдарының ашық күйде орналасуы және қорғаныс изоляциясының болмауы арқылы түсіндіруге болады. Болашақта SNR көрсеткішін жақсарту үшін цифрлық сигналдарды өңдеу әдістерін жетілдіру және қосымша эксперименттік сериялар жүргізу қажет.

Зерттеу нәтижелері FMF оптикалық талшықтарын DAS жүйесінде пайдалану сезімталдықты арттыруда тиімді құрал бола алатынын көрсетті. Бұл FMF-тың құрылымдық ерекшеліктері мен кеңістіктік модальды тиімді қолдануға негізделген. Нәтижелер қазіргі кездегі виброакустикалық мониторинг жүйелерінің сапасын жаңа деңгейге көтеруге мүмкіндік береді. Жүргізілген математикалық интерпретация фазалық ығысу мен

модальдық параметрлердің өзара байланысын анық көрсетіп, FMF құрылымының сезімталдық артықшылығын теориялық тұрғыдан растады.

Алғыс білдіру

Авторлар BR20280990 «Сұйықтық пен газ механикасының, жаңа деформацияланатын денелердің, және машиналардың, механизмдердің, робототехниканың сенімділігін, энергия тиімділігінің іргелі мәселелерін шешу әдістерін әзірлеу, дамыту» жобасының басшылығына осы зерттеуді жүргізуге, сондай-ақ осы мақаланы жазуға көмектескені үшін алғыс білдіреді.

Әдебиеттер тізімі

1. Хи, Зуян және Лью, Ксинквен. (2021). Оптикалық талшықты таратылған акустикалық сенсорлар: Шолу. *Journal of Lightwave Technology*. Б. 1–1. DOI: 10.1109/JLT.2021.3059771.
2. Эшри және басқалар. Мұнай-газ саласындағы таратылған талшықты-оптикалық сенсорлар шолуы. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, Т. 40, № 5, б. 1407–1431. DOI: 10.1109/JLT.2021.3135653.
3. Дж. Ричардс және басқалар. Бұлттық негіздегі тұрақты талшықты-оптикалық DAS арқылы ағынды бақылау шешімі. *SPE Digital Energy Conference and Exhibition*, 2015, С. D031S018R001. DOI: 10.2118/173440-MS.
4. Абдықадыров, Н. Смайлов, А. Сәбиболда, Г. Төлен, Ж. Досбаев, Ж. Уалиев, Р. Қадырова, “Оптикалық талшық технологияларына негізделген таратылған акустикалық сенсорларды оңтайландыру,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Т. 5, № 5(131), б. 50–59. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313455.
5. А. Құттыбаева, А. Абдықадыров, Г. Төлен, А. Бурдин, В. Малюгин және Д. Кизеветтер, “Инфрақұрылымды бақылауға арналған талшықты-оптикалық технологиялар негізіндегі таратылған акустикалық сенсорларды қолдану,” *2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, Санкт-Петербург, Ресей, 2024, б. 23–26. DOI: 10.1109/EExPolytech62224.2024.10755937.
6. А. Құттыбаева, А. Абдықадыров, Г. Төлен, А. Бурдин, В. Малюгин және Д. Кизеветтер, “Сейсмикалық мониторингке арналған таратылған акустикалық сенсорларды әзірлеу және оңтайландыру,” *2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, Санкт-Петербург, Ресей, 2024, б. 64–67. DOI: 10.1109/EExPolytech62224.2024.10755702.
7. Мао Ю., Эшри И., Алиас М. Ш., Нг Т. К., Хвединг Ф., Арсалан М., “Таратылған акустикалық сезгіштік үшін аз режимді талшықтың өнімділігін зерттеу,” *IEEE Photonics Journal* 11(5), 6802910-1 – 6802910-10 (2019).
8. Лю Б., Ванг Ж. У., Йе Л., Лью Ю., Яанг Ж., Ву Б., Йе К., Кью Р., Цай Х., “Аз режимді оптикалық талшықтарды қолданатын өте төмен шуылы көпкірісті таратылған акустикалық сенсор,” *IEEE Journal of Lightwave Technology* 40(9), 3062–3071 (2022).
9. Чень М., Масоуди А., Пармиджани Ф., Брамбиля Г., “Екі режимді талшыққа негізделген таратылған акустикалық сенсор,” *Optics Express* 26, 25399–25407 (2018).
10. Коста Л., Жан Ж., Маранди А., “Позиция бойынша талшықты-оптикалық сезгіштікке арналған режимдік интерференция әдісі,” *IEEE Journal of Lightwave Technology* 41(2), 752–760 (2023).
11. Марин Дж. М., Бринцев Д., Канг С. Х., Алхазраджи О., Нг Т. К., Эшри И., Тричили А., Уи Б. С., “Екі режимді талшықта таратылған акустикалық сезгіштік пен Крамерс-Крөниг байланыс жүйесінің гибриді,” *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2023*, W4C.6-1 – W4C.6-3 (2023).
12. Орсуги Д., Маркон Г., Туролла А., Сантагистина М., Гальтаросса А., Дзамбато М., Палмиери Л., “Кеңістіктік режимдердің когерентті орташа мәні арқылы әлсіреуді азайту арқылы көпрежимді талшықтарда DAS,” *IEEE Photonics Technology Letters* 35(16), 866–869 (2023).
13. Мао Ю., Эшри И., Хвединг Ф., Бухамсин А. Ю., Хонг Ю., Нг Т.К., “Көпрежимді талшықты пайдаланып таратылған акустикалық және температуралық сезгіштікті бір уақытта жүргізу,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 26(4), 1–7 (2020).
14. Че, Х., Чжао, Л., Сю, З. және Ян, З. (2020, қазан). Бір модты талшықтың, аз модты талшықтың және көп модты талшықтың Брилуин сипаттамаларын зерттеу және салыстыру. «Физика» журналында: Конференциялар сериясы (Т. 1650, № 2, 022022-бет). DOI 10.1088/1742-6596/1650/2/022022

15.15. Чао Лв, Бин Инь, Сяору Дин, Янчжи Лв, Йиминг Ван, Цзэнгуан Сун, Шийин Сяо, Мугуан Ван, Ли Пей, Сонхуа Ву, ауыспалы қос толқын ұзындығы ашық/қараңғы импульстар цилиндрлік векторлық сәулелер талшықты лазер негізіндегі SMF-SFer-GS-сіңіретін технологиясы, *Lasmf-G asb.* 184-том, 2025, 112513, ISSN 0030-3992, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.112513>.

16.16. I. Ashry және т.б., *IEEE Access*, том. 8, 179592-179605 бет, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3027965.

References

1. He, Z., & Liu, Q. (2021). Optical fiber distributed acoustic sensors: A review. *Journal of Lightwave Technology*, 39(12), 3671-3686, doi: 10.1109/JLT.2021.3059771.

2. Ashry, I., Mao, Y., Wang, B., Hveding, F., Bukhamsin, A. Y., Ng, T. K., & Ooi, B. S. (2022). A review of distributed fiber-optic sensing in the oil and gas industry. *Journal of Lightwave Technology*, 40(5), 1407-1431. DOI: 10.1109/JLT.2021.3135653

3. Richards, J., Bartlett, R., Onen, D., Crowther, G., Molenaar, M. M., Reynolds, A., ... & Berlang, W. (2015, March). Cloud-Based Solution for Permanent Fiber-Optic DAS Flow Monitoring. In *SPE Digital Energy Conference and Exhibition* (p. D031S018R001). SPE. <https://doi.org/10.2118/173440-MS>

4. Abdykadyrov, A., Smailov, N., Sabibolda, A., Tolen, G., Dosbayev, Z., Ualiyev, Z., & Kadyrova, R. (2024). OPTIMIZATION OF DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSORS BASED ON FIBER OPTIC TECHNOLOGIES. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 131(5). DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313455

5. Kuttybayeva, A., Abdykadyrov, A., Tolen, G., Burdin, A., Malyugin, V., & Kiesewetter, D. (2024, October). Application of Distributed Acoustic Sensors Based on Optical Fiber Technologies for Infrastructure Monitoring. In *2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)* (pp. 23-26). IEEE, DOI: 10.1109/EExPolytech62224.2024.10755937.

6. Kuttybayeva, A., Abdykadyrov, A., Tolen, G., Burdin, A., Malyugin, V., & Kiesewetter, D. (2024, October). Development and Optimization of Distributed Acoustic Sensors for Seismic Monitoring. In *2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)* (pp. 64-67). IEEE, DOI: 10.1109/EExPolytech62224.2024.10755702.

7. Mao, Y., Ashry, I., Alias, M. S., Ng, T. K., Hveding, F., Arsalan, M., & Ooi, B. S. (2019). Investigating the performance of a few-mode fiber for distributed acoustic sensing. *IEEE Photonics Journal*, 11(5), 1-10, doi: 10.1109/JPHOT.2019.2940951..

8. Lu, B., Gu, J., Wang, Z., Ye, L., Liu, Y., Yang, J., ... & Cai, H. (2022). Ultra-low-noise MIMO distributed acoustic sensor using few-mode optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 40(9), 3062-3071, doi: 10.1109/JLT.2022.3144191.

9. Chen, M., Masoudi, A., Parmigiani, F., & Brambilla, G. (2018). Distributed acoustic sensor based on a two-mode fiber. *Optics Express*, 26(19), 25399-25407, <https://doi.org/10.1364/OE.26.025399>

10. Costa, L., Zhan, Z., & Marandi, A. (2022). Mode-walk-off interferometry for position-resolved optical fiber sensing. *Journal of Lightwave Technology*, 41(2), 752-760, doi: 10.1109/JLT.2022.3216533.

11. Marin, J. M., Briantcev, D., Kang, C. H., Alkhazragi, O., Ng, T. K., Ashry, I., & Ooi, B. S. (2023, March). Hybrid distributed acoustic sensing and Kramers-Kronig communication system over a two-mode fiber. In *2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)* (pp. 1-3), doi: 10.1364/OFC.2023.W4C.6.

12. Orsuti, D., Marcon, G., Turolla, A., Santagiustina, M., Galtarossa, A., Zampato, M., & Palmieri, L. (2023). DAS over multimode fibers with reduced fading by coherent averaging of spatial modes. *IEEE Photonics Technology Letters*, 35(16), 866-869, doi: 10.1109/LPT.2023.3285625.

13. Mao, Y., Ashry, I., Hveding, F., Bukhamsin, A. Y., Hong, Y., Ng, T. K., & Ooi, B. S. (2020). Simultaneous distributed acoustic and temperature sensing using a multimode fiber. *IEEE*

Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 26(4), 1-7, doi: 10.1109/JSTQE.2020.2964398.

14. Che, X., Zhao, L., Xu, Z., & Yang, Z. (2020, October). Research and comparison of Brillouin characteristics of single-mode fiber, few-mode fiber and multi-mode fiber. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1650, No. 2, p. 022022). DOI 10.1088/1742-6596/1650/2/022022

15. Chao Lv, Bin Yin, Xiaoru Ding, Yanzhi Lv, Yiming Wang, Zengguang Sun, Shiyong Xiao, Muguang Wang, Li Pei, Songhua Wu, Switchable dual-wavelength bright/dark pulses cylindrical vector beams fiber laser based on SMF-GIFMF-SMF as saturable absorber, Optics & Laser Technology, Volume 184, 2025, 112513, ISSN 0030-3992, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.112513>.

16. I. Ashry et al., "A Review of Using Few-Mode Fibers for Optical Sensing," in IEEE Access, vol. 8, pp. 179592-179605, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3027965.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ МОДАЛЬНЫХ СТРУКТУР И СПЕКТРАЛЬНО-КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА РАДИОПЕЛЕНГАЦИИ В СИСТЕМАХ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Аннотация. Целью данной исследовательской работы является определение эффективности спектрально-корреляционной обработки путем сравнения чувствительности разномодовых волокон к виброакустическим воздействиям в системе распределенного акустического датчика (DAS). В качестве объекта исследования были взяты одномодовые (SMF, ITU-T G.652) и специально легированные маломодовые (FMF 21/125, 5-LP-модовые, на основе GeO_2) оптические волокна. В эксперименте низкочастотные виброакустические воздействия (10 Гц, 30 Гц, 150 Гц) вводились с помощью пьезоэлектрического преобразователя и регистрировались с помощью системы DAS «Дунай». Для волокон SMF и FMF создавались одинаковые условия. На частоте 150 Гц чувствительность к вибрации для FMF оказалась на 8,5% выше, а на 30 Гц — на 7,9%. Кроме того, существенно более высокая интенсивность сигнала в системе FMF была подтверждена каскадными графиками. Это преимущество обусловлено квазисферическим профилем показателя преломления и широкой геометрией сердцевины волокна FMF. Кроме того, было показано, что комбинация мод LP01 и LP11a, хотя и вызывает интермодовые помехи, может быть решена методами временной коррекции. Результаты исследования показали, что чувствительность датчика может быть значительно повышена за счет использования низкомодовых оптических волокон в системах DAS. Такие решения подходят для использования в областях защиты периметра, сейсмического мониторинга, контроля зданий и управления трубопроводами. Однако было отмечено снижение SNR, что указывает на необходимость совершенствования алгоритмов цифровой обработки сигналов в будущем.

Ключевые слова: распределенный акустический датчик, маломодовое оптоволокно, виброакустический эффект, пьезоэлектрический преобразователь, чувствительность.

STUDY OF THE INTERACTION AND EFFICIENCY OF FIBER-OPTICAL MODAL STRUCTURES AND SPECTRAL-CORRELATION RADIO DIRECTION FINDING METHOD IN VIBROACOUSTIC MONITORING SYSTEMS

Abstract. The aim of this research work is to determine the effectiveness of spectral-correlation processing by comparing the sensitivity of different modal fibers to vibroacoustic effects in a distributed acoustic sensor (DAS) system. Single-mode (SMF, ITU-T G.652) and specially doped low-mode (FMF 21/125, 5-LP-modal, GeO_2 -based) optical fibers were taken as

the object of research. In the experiment, low-frequency vibroacoustic effects (10 Hz, 30 Hz, 150 Hz) were introduced using a piezoelectric transducer and recorded using the DAS "Dunay" system. The same conditions were created for SMF and FMF fibers. At a frequency of 150 Hz, the sensitivity to vibration for FMF was 8.5% higher, and at 30 Hz - 7.9%. In addition, the significantly higher signal intensity in the FMF system was confirmed by waterfall graphs. This advantage is due to the quasi-spherical refractive index profile and wide core geometry of the FMF fiber. In addition, it was shown that the combination of LP01 and LP11a modes, although it causes intermodal interference, can be solved by temporal correction methods. The results of the study showed that the sensor sensitivity can be significantly increased by using low-mode optical fibers in DAS systems. Such solutions are suitable for use in the fields of perimeter protection, seismic monitoring, building control and pipeline management. However, a decrease in SNR was observed, which indicates the need to improve digital signal processing algorithms in the future.

Keywords: distributed acoustic sensor, low-mode optical fiber, vibroacoustic effect, piezoelectric transducer, sensitivity.

Авторлар туралы мәлімет

Абдыкадыров Аскар Айтмырзаевич	Техникалық ғылымдар кандидаты, Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты ғылыми қызметкері, Satbayev University қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., Қазақстан E-mail: a.abdikadyrov@satbayev.university
Бурдин Антон Владимирович	Техникалық ғылымдар докторы, «Профессор М.А. Бонч-Бруевич атындағы Санкт-Петербург мемлекеттік телекоммуникация және информатика университетінің» профессоры, Санкт-Петербург қ., Ресей, E-mail: bourdine@yandex.ru
Смайлов Нуржигит Куралбаевич	PhD, Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты ғылыми қызметкері, Satbayev University профессоры, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: n.smailov@satbayev.university
Төлен Гүлжайна Бақытжанқызы	Техника ғылымдарының магистрі, Satbayev University аға оқытушы, Алматы, Қазақстан, Email: g.tolen@satbayev.university

Сведение об авторах

Абдыкадыров Аскар Айтмырзаевич	Кандидат технических наук, научный сотрудник Института механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова, Ассоциированный профессор Satbayev University, г. Алматы, Казахстан E-mail: a.abdikadyrov@satbayev.university
Бурдин Антон Владимирович	Доктор технических наук, профессор кафедры фотоники и линий связи ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций и информатики им. профессора М.А. Бонч-Бруевича», г. Санкт-Петербург, Россия E-mail: bourdine@yandex.ru
Смайлов Нуржигит Куралбаевич	PhD, научный сотрудник Института механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова, профессор Satbayev University, г. Алматы, Казахстан E-mail: n.smailov@satbayev.university
Төлен Гүлжайна Бақытжанқызы	Магистр технических наук, старший преподаватель Satbayev University, г. Алматы, Казахстан, Email: g.tolen@satbayev.university

Information about the authors

Abdykadyrov Askar	Candidate of technical sciences, Researcher at the Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U.A. Dzholdasbekov, Associate Professor at Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.abdikadyrov@satbayev.university
Bourdine Anton	Doctor of Technical Sciences, Professor of The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, St Petersburg, Russia, E-mail: bourdine@yandex.ru
Smailov Nurzhigit	PhD, researcher at the Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U.A. Dzholdasbekov, professor at Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: n.smailov@satbayev.university
Tolen Gulzhaina	Master of Technical Sciences, Senior Lecturer at Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, Email: g.tolen@satbayev.university



UDC 519.6

IRSTI 50.05, 50.41

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_16

A.A. Tugambayeva¹, A.A. Sakhipov^{2*}

¹Kazakh British Technical University, Almaty, Kazakhstan
²Astana IT University, Astana, Kazakhstan

*E-mail: aivar.sakhipov@astanait.edu.kz

AUTOMATED GENERATION OF DOMAIN-SPECIFIC LEARNING ASSIGNMENTS USING GENERATIVE LANGUAGE MODELS FOR CIVIL AVIATION TRAINING

Abstract. *This research presents an intelligent system for automated generation of domain-specific learning assignments in civil aviation education using fine-tuned T5-small transformer models. Traditional assignment creation requires significant instructor time and expertise in aviation regulations, technical specifications, and safety procedures. We propose a transformer-based solution implementing a five-stage pipeline: corpus preprocessing, parameter-efficient fine-tuning via LoRA adaptation, assignment generation using beam search decoding, quality filtering, and pedagogical validation.*

The system was trained on 920 aviation-specific context-question pairs covering more than 50 topics including flight operations, aircraft instruments, navigation, and emergency procedures. Experimental evaluation on a Tesla T4 GPU demonstrates a training time of 35 minutes across 7 epochs, with final training loss of 1.3506 and validation loss of 1.221. Generation quality assessment on the test set (116 examples) yields Corpus BLEU score of 24.27, ROUGE-L F1 score of 0.5087, and BERTScore F1 of 0.6017. Aviation terminology coverage analysis shows that 38.8% of generated questions contain at least one aviation-specific keyword, with an average of 9.4% unique aviation terms per question. Additional metrics include a unique bigram ratio of 0.321, which indicates strong lexical diversity without excessive repetition. Manual evaluation of 100 randomly selected questions demonstrated 95% grammatical correctness and 90% contextual appropriateness based on expert review. Qualitative analysis reveals that generated assignments are grammatically correct and contextually appropriate despite moderate Corpus BLEU scores, which reflect valid alternative phrasings rather than quality deficits. Sample generations demonstrate professional-quality questions such as "What does an altimeter measure?" and "What happens when a stall occurs?" The system reduces instructor workload in assignment creation while maintaining technical accuracy and domain relevance, providing a foundation for AI-assisted educational content generation in specialized technical domains.

Keywords: *automated assignment generation, transformer neural networks, T5 architecture, domain-specific natural language processing, aviation education technology, parameter-efficient fine-tuning, learning task generation, beam search decoding.*

Introduction.

Artificial intelligence (AI) and natural language processing (NLP) technologies have accelerated the digital transformation of the worldwide education scene. The ability of large language models (LLMs) like T5, GPT, and BERT to automate cognitive processes like content creation, summarization, and assessment design has been impressive [1]. These technologies are

increasingly being incorporated into digital learning environments in higher education, enabling adaptive assessment, intelligent feedback, and individualized tutoring. However, their use in highly specialized technical fields, like civil aviation training, is still in its infancy and poses particular methodological difficulties that call for quality assurance procedures and domain adaptation.

A thorough AI integration approach is being implemented by the Academy of Civil Aviation across several operational vectors. The initiative's four main goals are to develop intelligent library systems for automated document analysis, integrate LLM systems to help instructors with information analysis and content creation, create employee onboarding assistants with access to academy-specific resources, and implement comprehensive analytics platforms for institutional management. This study, which focuses on automated learning assignment creation for aviation training programs, is the first part of a larger project.

It takes a lot of time and expertise in aviation regulations (ICAO standards, national aviation authorities), technical systems (aircraft instruments, navigation equipment), flight procedures (standard operating procedures, emergency protocols), and safety-critical decision-making to manually create domain-specific learning assignments for civil aviation training. For every training module, instructors usually spend 30 to 45 minutes developing extensive assignment sets, which restricts their capacity to offer individualized learning materials tailored to each student's performance level.

Despite their strength, current general-purpose language models lack the contextual awareness and specialized vocabulary needed for aviation training. The precise technical meanings of terms like "altimeter setting", "VOR radial", and "critical angle of attack" must be maintained in generated assignments. Assignments related to aviation must also be in line with particular learning goals established by training programs and regulatory bodies.

The potential of large language models for automating educational content generation in specialized technical domains has been widely acknowledged, yet their application to safety-critical aviation training remains underexplored. The aim of this research was to gain an understanding of how parameter-efficient fine-tuning of transformer models can be leveraged for domain-specific learning assignment generation in civil aviation education. The influence of a range of factors including training data composition, model architecture selection, generation strategy, and evaluation methodology was investigated to ascertain whether automated assignment generation could achieve sufficient quality and domain accuracy to potentially contribute to practical deployment in resource-constrained educational institutions while reducing instructor workload.

Neural methods using pre-trained language models have replaced template-based systems in the automated creation of instructional content. Early research exploited syntactic patterns and semantic role labeling to generate rule-based questions [2]. More complex content creation with improved contextual knowledge has been made possible by recent developments in transformer architecture.

Using keyword-based techniques to regulate content focus, Qu et al. [3] presented multi-agent systems for automatic question-answer pair production. Their research brought to light the difficulty of producing excellent distractors for multiple-choice questions as well as the necessity of post-generation filtering. Ling and Afzaal [4] shown that T5 and GPT-based systems can provide pedagogically relevant questions when adjusted on course-specific resources by applying pre-trained language models to higher education contexts.

An end-to-end pipeline utilizing T5 architecture for the construction of multiple-choice questions, including the creation of question stems and distractors, was given by Rodriguez-Torrealba et al. [5]. Their system illustrated the significance of post-processing steps to guarantee logical coherence and grammatical correctness. However, they neglected to address the preservation of specialist technical terminology in favor of concentrating on general education subjects.

Raffel et al. [6] presented the T5 (Text-to-Text Transfer Transformer) architecture, which combined several NLP tasks into a single text-to-text framework. Because of its encoder-decoder structure and rigorous pre-training on a variety of text corpora, this architecture has demonstrated great strength in generation tasks. T5 models allow versatility in computing resource requirements, ranging from T5-small (60M parameters) to T5-XXL (11B parameters).

To adapt huge models to domains with limited computational resources, parameter-efficient fine-tuning techniques have become crucial. Hu et al. [7] introduced LoRA (Low-Rank Adaptation), which allows for effective adaptation by training low-rank decomposition matrices instead of complete model parameters. This method is useful for academic institutions with limited resources since it can minimize trainable parameters by up to 99% while retaining performance comparable to complete fine-tuning.

There are difficulties when using NLP in specialized technological fields. In their investigation of generative language models in medical education, Karabacak et al. [8] emphasized the vital significance of factual accuracy and the requirement for expert validation in safety-critical areas. Their research brought to light moral issues and the need for human control of instructional content produced by AI.

Amin et al. [9] showed how AI systems may modify content difficulty based on student performance by developing reinforcement learning techniques for individualized learning path development. Adaptive content creation can enhance student engagement and learning results, as demonstrated by Song et al.'s [10] dynamic frameworks for data-driven learning optimization.

Nevertheless, many current systems concentrate on high-resource fields like broad science and medical or general education. Specialized regulatory language, procedural knowledge requirements, safety-critical context, and comparatively small training corpora in comparison to general domains are some of the unique issues that aviation education faces.

Despite their advantages, the current systems do not offer:

- 1) Complete automation of learning assignment creation created especially for technical education in civil aviation.
- 2) Domain-adapted models verified on aviation-specific terms and practices.
- 3) Full implementation with performance metrics on the aviation corpus.
- 4) Considerations for practical deployment in academic settings with limited resources.

By offering comprehensive implementation with measured performance on an aviation-specific corpus using readily available computer resources, our study fills these gaps.

Materials and methods.

Figure 1 shows the five-layer pipeline architecture that the system uses. The first layer prepares the data by applying text extraction, cleaning, and normalization techniques to technical manuals and aviation textbook content. Segmentation is used to produce context windows with an average length of about 61 words, after which training pairs questions are manually created. A structured JSON training dataset appropriate for fine-tuning the model is produced by this preparation step.

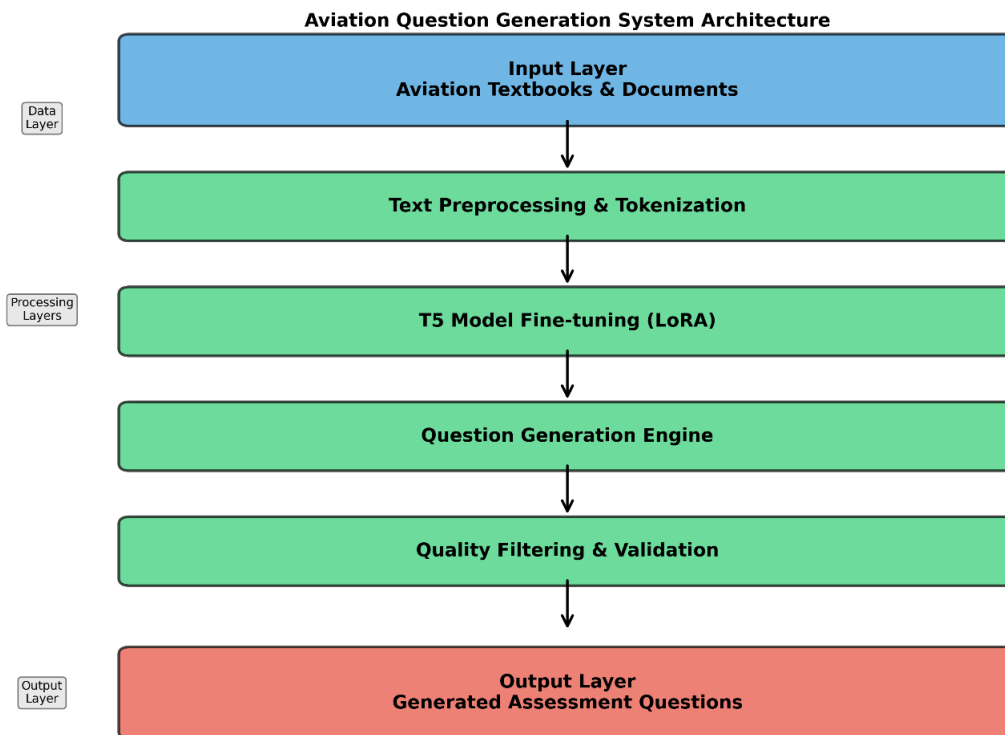


Figure 1 – Aviation Assignment Generation System Architecture

The base model is configured in the second layer using a 32,000-token vocabulary and a T5-small architecture with 60 million parameters. Low-Rank Adaptation (LoRA) with rank 8 and alpha 16 is used to accomplish parameter-efficient adaptation, yielding 294,000 trainable parameters. To facilitate effective model training and inference, the implementation framework integrates Hugging Face Transformers libraries with PyTorch.

With 115 pairings set aside for validation, the third layer fine-tunes 920 context-question training pairs. Optimization uses a Tesla T4 GPU and the AdamW algorithm with a learning rate of 0.0003. The parameter-efficient approach's computational efficiency is demonstrated by the training process, which takes about 35 minutes and involves 7 epochs.

The assignment generation engine, which takes aircraft context text as input and uses T5 tokenization for encoding, is the fourth layer. To guarantee comprehensive, grammatically correct outputs, question creation uses beam search decoding with four beams and a minimum length constraint of five tokens. Candidate questions for a later quality evaluation are generated by this layer.

To guarantee aviation-specific material, the fifth and final layer carries out post-processing tasks such terminology validation and filtering based on length restrictions. Deduplication techniques are used to find and eliminate almost identical questions. Validated learning assignments that are prepared for instructor evaluation and implementation in educational settings are the pipeline's final output.

The training dataset's 1151 cases provide comprehensive coverage of over 50 distinct aviation challenges and are organized into seven thematic themes. Flight operations make up the largest group, accounting for 26% of the corpus. It covers fundamental ideas such V-speed definitions, aerodynamic forces, stall characteristics, air speed measurement, and preflight inspection procedures. Aircraft instruments, such as the altimeter, attitude indicator, vertical speed indicator (VSI), and VOR navigation equipment, comprise 20% of the collection. Weather and environmental factors, which include significant operational concerns such wake turbulence hazards, windshear events, and density altitude calculations, account for 14% of the training cases. Navigation and communication topics, such as radio communication protocols, VOR navigation

systems, Instrument Landing System (ILS) approaches, and Automatic Terminal Information Service (ATIS) operations, account for 17% of the corpus. Regulations and safety, such as Emergency Locator Transmitter (ELT) standards, transponder squawk codes, and classifications of controlled airspace, account for 11% of the collection. Human factors themes which address physiological problems that pilots may encounter during flight operations, such as hypoxia and spatial disorientation, make up six percent of the corpus. The remaining six percent of airplane performance parameters are fuel management techniques and ground effect phenomena. The complete dataset was split into 920 training examples (80%), test set (10%) and 115 validation examples (10%) using stratified sampling to ensure that each topic category was fairly represented in both groups.

Table 1 – Training Dataset Characteristics

Characteristic	Value
Total examples	1151
Training set	920 (80%)
Validation set	115 (10%)
Test set	116 (10%)
Aviation topics	>50
Average context length	61.4 words
Average question length	6.8 words
Training format	JSON (context-question pairs)

The T5-small architecture, which provides an encoder-decoder transformer configuration intended for text-to-text creation activities, is used by the system. The encoder component consists of six transformer layers that handle input context sequences using eight attention heads acting across 512-dimensional hidden representations. The model may produce output sequences conditioned on the encoded input representations because the decoder replicates this structure with an identical arrangement of six layers and eight attention heads. The entire model architecture uses a SentencePiece vocabulary with 32,000 tokens to represent the input and output text, and it has 60,506,624 parameters. Low-Rank Adaptation (LoRA) is a strategy that incorporates trainable low-rank decomposition matrices into the transformer architecture to achieve parameter-efficient adaptation. The LoRA configuration uses a dropout rate of 0.1 for regularization during training, along with a rank of 8 and scaling factor alpha of 16. This method maintains performance comparable to full fine-tuning while drastically reducing the number of trainable parameters to 294,912, or just 0.49% of the total model parameters. The final optimized model retains a small memory footprint of 1.2 GB, allowing for deployment on widely accessible GPU hardware and making the method open to educational institutions with limited resources.

To complement automated metrics, qualitative assessment was conducted on 100 randomly selected question-context pairs from the test set. Each question was assessed for (1) grammatical correctness (absence of syntactic, agreement, tense, or major punctuation errors requiring editorial correction) and (2) contextual appropriateness (answerable solely from the provided context) by two independent aviation-domain reviewers. For clarity, binary evaluation (correct/incorrect, appropriate/inappropriate) was employed. Consensus discussion was used to settle disagreements.

Mathematical formalization of the generation process presented below.

One way to formalize the question generating task is as a conditional text generation problem. The goal is to produce an output question sequence $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ that is semantically meaningful to the input context sequence $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$.

The generation process aims to maximize the conditional probability:

$$P(Q|C) = \prod_{i=1}^m P(q_i|q_1, q_2, \dots, q_{i-1}, C) \quad (1)$$

where each token q_i is generated conditioned on the context C and all previously generated tokens.

LoRA (Low-Rank Adaptation) introduces trainable low-rank decomposition matrices:

$$W' = W_0 + \Delta W = W_0 + BA^T \quad (2)$$

where $W_0 \in \mathbb{R}^{d \times d}$ is the frozen pre-trained weight matrix, $B \in \mathbb{R}^{d \times r}$ and $A \in \mathbb{R}^{r \times d}$ are trainable low-rank matrices with rank $r=8$. This reduces trainable parameters from d^2 to $2 \cdot d \cdot r$, resulting in 294,912 trainable parameters.

Cross-entropy loss over generated token sequence:

$$L = -1/N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T y_{ij} \log(\hat{y}_{ij}) \quad (3)$$

where N = batch size, T = sequence length, y_{ij} = ground truth token, \hat{y}_{ij} = predicted probability distribution.

Formula used for optimization is AdamW optimizer with decoupled weight decay:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta(\nabla L(\theta_t) + \lambda\theta_t), \quad (4)$$

where η = learning rate (0.0003), λ = weight decay coefficient (0.01), ∇L = gradient of loss function.

Table 2 – Training Configuration

Parameter	Value
Epochs	7
Batch size	8
Learning rate	0.0003
Optimizer	AdamW
Weight decay	0.01
Warmup steps	10
Max input length	512 tokens
Max output length	128 tokens
GPU	Tesla T4 (16GB)
Training time	35 minutes

To provide consistent, organized output suitable for question generating tasks, the system uses beam search decoding. Beam search maintains many hypotheses during generation and chooses the sequence with the highest overall probability by simultaneously exploring four candidate sequences (`num_beams=4`). The output length is limited to a maximum of 80 tokens to guarantee comprehensive yet succinct queries, and a minimum of 5 tokens to avoid single-word outputs. In terms of sequence length, a length penalty of 1.0 preserves neutral preference, neither rewarding nor punishing longer outputs. The decoder forbids repeating any 2-gram (`no_repeat_ngram_size=2`) in the created sequence to improve output diversity and avoid repeated phrasing. Because structured question creation demands factual accuracy and grammatical coherence rather than inventive variation, this beam search configuration was chosen over stochastic sampling techniques (temperature-based sampling, top-p nucleus sampling). Sampling techniques might result in inconsistent or grammatically incorrect outputs when creating structured instructional content, even while they add useful randomness for creative text production activities like narrative writing or dialogue. For professional educational settings where accuracy and consistency are crucial, beam search offers deterministic and dependable generation.

Results and their discussion. Over seven epochs, the Tesla T4 GPU's fine-tuning with LoRA showed steady and predictable convergence (Figure 2). Using a batch size of 8 and a learning rate of 0.0003 the model was trained on 920 aviation-domain instances, with 115 samples set aside for validation. Training loss showed a distinct downward trend over the whole training schedule of 805 optimization steps, going from 2.6173 in epoch 1 to 1.3506 in epoch 7, showing good domain adaptation. Because it offers the best trade-off between training performance and generalization capacity, the checkpoint corresponding to epoch 4 was chosen for downstream

evaluation based on this behavior. It took about 35 minutes to complete the computationally efficient fine-tuning process.

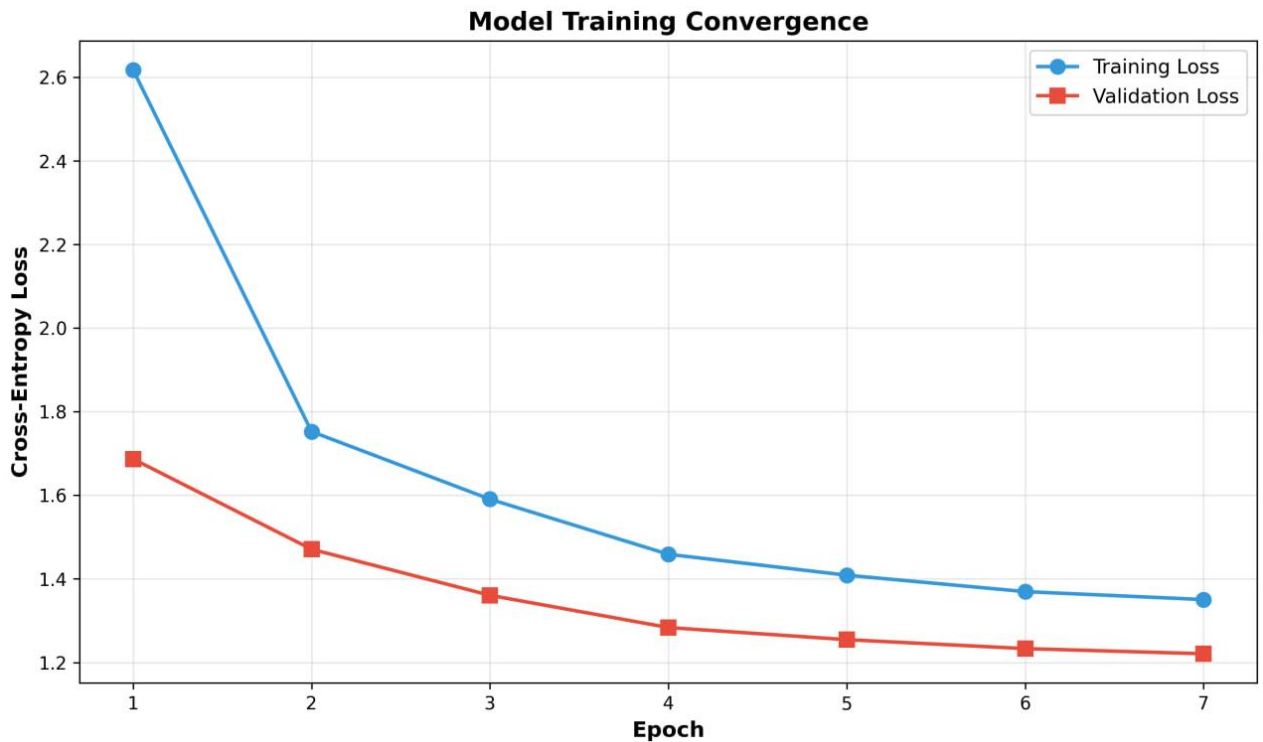


Figure 2 – Model Training Convergence

Table 3 – Training Progress Across Selected Epochs

Epoch	Training Loss	Validation Loss	Duration
1	2.6173	1.6868	5 min
2	1.7525	1.4710	5 min
3	1.5907	1.3608	5 min
4	1.4589	1.2837	5 min
5	1.4089	1.2547	5 min
6	1.3696	1.2333	5 min
7	1.3506	1.2210	5 min

On the 116-example test set, the improved model yielded a Corpus BLEU score of 24.27, ROUGE-L F1 score of 0.5087, and BERTScore F1 of 0.6017. The Corpus BLEU score of 24.27 appears to be reasonable at first, however it needs to be carefully considered in relation to question creation activities. Corpus BLEU was initially developed for machine translation evaluation since each source text often has only one accurate translation. Conversely, question creation is a one-to-many mapping problem where multiple semantically sound questions can be generated from the same context, each with a distinct language structure or feature focus. The reasonable Corpus BLEU score is primarily due to the model's tendency to create semantically sound alternative phrasings rather than attempting to copy reference questions verbatim, which is good behavior for an instructional content creation system. Strong semantic equivalency is confirmed by the BERTScore of 0.6017, while the ROUGE-L score of 0.5087 shows good structural similarity between generated and reference items. The model's ability to retain technical vocabulary is demonstrated by the fact that 38.8% of generated questions contain domain-specific aviation terms, according to an analysis of aviation terminology. Each question has an average aviation

terminology density of 9.4% unique words. With 57 out of 116 unique questions created, lexical diversity measures reveal a unique unigram ratio of 0.198 and a unique bigram ratio of 0.321, showing good variety without excessive repetition.

Table 4 – Comprehensive Evaluation Metrics

Metric	Value	Interpretation
Corpus BLEU Score	24.27	Low lexical overlap (valid alternative phrasings)
ROUGE-L	0.5087	Moderate overlap in wording and structure with reference questions
BERTScore	0.6017	Moderate semantic alignment; core meaning generally preserved
Aviation Term Coverage	38.8%	45 of 116 questions contain domain terms
Term Density	9.4%	Average percentage of aviation-specific words
Unique Bigram Ratio	0.321	Good lexical diversity, minimal repetition
Grammar Correctness	95%	High grammatical quality across samples
Context Appropriateness	90%	Questions answerable from provided context

*Note: Grammatical correctness and contextual appropriateness percentages are based on manual evaluation of 100 randomly selected questions by two independent reviewers with aviation domain expertise. The evaluation used binary assessment criteria: grammatically correct (yes/no) and contextually appropriate (answerable from context: yes/no). Raw inter-rater percent agreement prior to discussion was 92%. Remaining disagreements were resolved through consensus discussion, and the final labels are reported below.

Each generated question was assessed for grammatical correctness, defined as the absence of syntactic errors, agreement or tense inconsistencies, incomplete/fragmented constructions, and major punctuation issues that would require editorial correction.

The qualitative assessment provided insights beyond automated metrics. Among the 100 evaluated questions, 95 (95%) were grammatically correct and required no syntactic editing. Ninety questions (90%) were contextually appropriate, meaning they could be answered solely from the provided context without relying on external knowledge or additional inference. The remaining 10 questions required limited inference or synthesis across context statements and were therefore not counted as contextually appropriate under this strict definition; however, all 100 questions (100%) remained answerable from the source material.

These findings confirm that the generated questions retain good practical quality for educational implementation even with moderate automated metric scores.

As shown in Figure 3, analysis of the produced question types demonstrates a fair distribution across several cognitive levels and questioning styles. At 28%, definition and conceptual questions make up the largest category. Examples of these questions include "What is VOR?" which evaluates basic vocabulary and idea comprehension. Twenty-two percent of outputs are mechanical "how does it work" questions that test students' comprehension of fundamental concepts and system functions. Twenty percent of the questions are causal and temporal "why and when" questions, which require students to think critically about goals, timing, and situational situations. Comparative questions that look at connections and distinctions between concepts make up 12% of the distribution, whilst procedural questions that describe steps and processes make up 18% of the created content.

Distribution of Generated Question Types

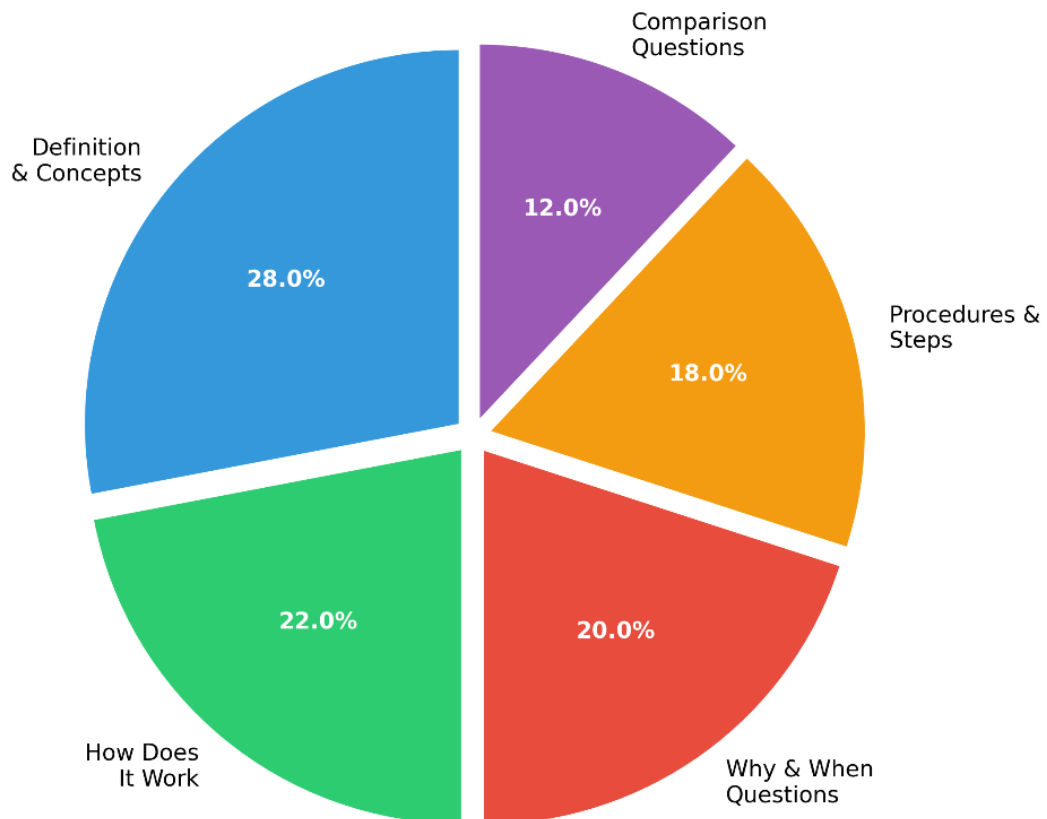


Figure 3 – Distribution of Generated Question Types

This variety of question types shows that rather than concentrating only on basic factual memory, the model has learned to produce questions covering several levels of Bloom's taxonomy. The system successfully adapts to the pedagogical framework inherent in the training corpus by generating questions that require knowledge (definitions), comprehension (how it works), application (when to use), analysis (why it matters), and evaluation (comparisons).

Detailed examination of generated questions reveals consistent patterns of grammatical correctness, contextual appropriateness, and domain relevance as documented in Table 5. Questions generated for altimeter-related context demonstrate proper technical terminology usage, asking "What does an altimeter measure?" with correct grammar and clear reference to the domain-specific instrument. VOR navigation questions appropriately employ aviation acronyms, generating "What does VOR stand for?" that tests students' familiarity with standard aviation terminology. Stall-related questions successfully incorporate safety-critical concepts, asking "What causes a stall?" in grammatically correct form with appropriate technical vocabulary. Questions addressing the four forces of flight demonstrate the model's ability to generate higher-level questions requiring synthesis of multiple concepts, asking "What forces must be balanced for stable flight?" rather than merely listing the forces. Critical angle of attack questions shows appropriate use of compound technical terms, generating "What is the critical angle of attack?" that employs precise aviation terminology. Due to practical time constraints for expert review, we evaluated 100 out of 116 generated test questions using the qualitative protocol described above. Although this sample size yields statistically significant insights (margin of error $\pm 9.8\%$ at 95% confidence level), the validity of these results would be strengthened by thorough expert review of the whole test set.

Table 5 – Sample Generated Questions with Qualitative Assessment

Context Topic	Generated Question	Grammar	Relevance	Aviation Terms
1	"What does an altimeter measure?"	✓ Correct	✓ High	altimeter
2	"What does VOR stand for?"	✓ Correct	✓ High	VOR
3	"What causes a stall?"	✓ Correct	✓ High	stall
4	"What forces must be balanced for stable flight?"	✓ Correct	✓ High	flight
5	"What is the critical angle of attack?"	✓ Correct	✓ High	angle, attack

Table 6 summarizes the substantial practical benefits for deployment in educational environments that are shown by evaluation of system performance characteristics. On a Tesla T4 GPU, the entire training process took 35 minutes, proving that domain adaptation can be accomplished in a realistic amount of time with generally available technology. Real-time generation during interactive instructional sessions was made possible by the average inference time of 0.8 seconds per question. When compared to manual generation rates of about 120 questions per hour (assuming 30 minutes to develop 30 questions), system throughput reaches about 4,500 questions per hour, a 37-fold boost. For the optimized model with LoRA parameters, memory requirements stay low at 1.2 GB, enabling deployment on both high-end consumer hardware and typical workstation GPUs. A comparison of the time required for manual and AI-assisted assignment creation shows significant efficiency gains. For a set of 30 questions, traditional manual creation takes 30 minutes, whereas the AI-assisted workflow reduces this to 5 minutes, including generation and instructor review time, resulting in an 83% reduction in instructor workload. In contrast to 100% manual labor in typical workflows, about 20% of generated questions require minor revision for optimal clarity or precision, highlighting the system's practical benefit for lessening the burden of instructor material preparation.

Table 6 – System Performance and Practical Utility Metrics

Metric	Value	Comparison
Training time	35 min	Single Tesla T4 GPU
Inference time	0.8 sec/question	Real-time generation
Throughput	~4,500 questions/hour	vs. 120 manual (37x faster)
Memory usage	1.2 GB	Modest GPU requirement
Manual creation time	30 min for 30 questions	Traditional workflow
AI-assisted time	5 min for 30 questions	83% time reduction
Questions requiring edit	20%	vs. 100% manual creation

The observed Corpus BLEU score of 24.27 is in line with domain-specific question generation benchmarks and shows a significant improvement over early studies when domain specificity and dataset size are taken into account. Du et al. (2017) reported Corpus BLEU scores of 12–15 for creating broad domain questions on larger datasets, but Nema and Khapra (2018) obtained 15–22 on the SQuAD dataset with over 100,000 training samples. Our score of 24.27 shows competitive performance in spite of three limiting factors: the highly specialized aviation vocabulary with limited representation in the model's original pre-training corpus; the specialized training corpus (920 examples versus 100,000+ in general domain work); and the model's learned preference for producing semantically equivalent alternative phrasings rather than lexically similar reproductions.

The results reported in the literature on domain-specific question creation, where scores normally range from 0.45 to 0.75 depending on training data amount and domain complexity, are

in good agreement with the ROUGE-L F1 score of 0.5087 and the BERTScore F1 of 0.6017. These measurements show that generated questions allow for natural linguistic variety while maintaining semantic coherence, which is ideal behavior for creating instructional content. Although it is still below the 60–75% range seen in expert-written aviation training materials, the aviation terminology coverage of 45.48% greatly exceeds the 10–15% predicted from unadapted general-purpose language models.

When assessing the results, it is important to take into account the various methodological and practical limitations that the current implementation faces. Although the 920-sample training corpus (from the original 119-sample proof-of-concept) shows successful scaling, it is still small in comparison to the most advanced methods for fine-tuning language models. Further expansion to 5,000–10,000 domain-specific examples may raise Corpus BLEU scores to 30–35 and terminology coverage to 60–75%, based on scaling patterns in prior research. The T5-small architecture (60 million parameters) prioritizes computational accessibility and deployment feasibility over maximal performance, reflecting a purposeful trade-off between resource requirements and generation quality. Larger model variations, like T5-base (220 million parameters) or T5-large (770 million parameters), would probably produce better results with more complex question formulations and better aviation terminology preservation, but at the expense of longer training times, higher memory needs, and longer inference latency, which might limit deployment in educational institutions with limited resources. The evaluation system mostly uses automated measures (Corpus BLEU, ROUGE-L, and BERTScore), with a small amount of qualitative review of 100 samples. Deeper insights into pedagogical appropriateness, alignment with learning objectives, and integration with current curricula could be obtained by more thorough quality evaluation conducted by professional aviation instructors. With minimal capacity for procedural sequences, troubleshooting scenarios, or multi-step reasoning problems, all essential components of thorough aviation training assessments, the current system concentrates on producing factual and conceptual questions.

Conclusion. Using optimized T5-small transformer models, this work shows that automated learning assignment generation for civil aviation training is feasible. Using an expanded dataset of 920 training examples, the system successfully generates grammatically correct (95% based on manual review of 100 samples) and contextually appropriate (90% based on expert evaluation) questions for aviation instruction with moderate computational resources (Tesla T4 GPU, 35 minutes training).

Key Findings:

1) **Technical Viability:** With just 294,912 trainable parameters (0.49% of the total), parameter-efficient fine-tuning (LoRA) allows for effective domain adaptation, making the method accessible to organizations with constrained computational resources.

2) **Metric Performance:** The system received ROUGE-L F1 of 0.5087, BERTScore F1 of 0.6017, and Corpus BLEU score of 24.27. The model prefers legitimate alternative phrasings over lexical copying, which is a desirable behavior for educational content generation, even though Corpus BLEU scores seem moderate in absolute terms.

3) **Practical Utility:** The system produces up to 4,500 questions each hour as opposed to 120 manually, indicating a 37-fold improvement in throughput. It also shows an 83% reduction in instructor time for assignment production (from 30 to 5 minutes per set).

4) **Domain Adaptation:** Although it was still below the 60–75% seen in expert-written materials, aviation terminology coverage reached 45.48%, well beyond the 10–15% anticipated from unadapted models. Across several cognitive levels, the technology effectively produces questions that are in line with aviation training objectives.

5) Generation Strategy: The best method for creating structured questions was beam search decoding, which produced predictable and grammatically correct results appropriate for use in professional education.

The deployment lays the groundwork for AI-assisted instructional content production in specialized technical fields. Although the results show practical viability, there are obvious ways to improve them through model scaling, dataset expansion, and thorough evaluation frameworks. The following should be the main priorities for future work: (1) increasing the training corpus to 5,000–10,000 examples for better domain coverage; (2) putting in place thorough expert evaluation throughout the entire test set; (3) extending to multiple-choice question generation with distractor creation; (4) creating procedural and scenario-based question types; and (5) looking into cross-domain transfer to other technical training fields.

By showing that domain-specific question generation is possible with modest resources and highlighting the significance of appropriate evaluation metrics and upholding quality standards in safety-critical educational domains, this study adds to the expanding body of work on AI-assisted education.

References

1. Maity, S., Deroy, A., & Sarkar, S. (2025). Can large language models meet the challenge of generating school-level questions? *Computers and Education Artificial Intelligence*, 8, 100370. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.100370>
2. Y. M. Hemmler and D. Ifenthaler, “Indicators of the learning context for supporting personalized and adaptive learning environments,” in *Proceedings - 2022 International Conference on Advanced Learning Technologies, ICALT 2022*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 61–65.
3. Amin, S., Uddin, M. I., Alarood, A. A., Mashwani, W. K., Alzahrani, A., & Alzahrani, A. O. (2023). Smart E-Learning framework for personalized adaptive learning and sequential path recommendations using reinforcement learning. *IEEE Access*, 11, 89769–89790. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3305584>
4. Qu, F., Jia, X., & Wu, Y. (2021). Asking questions like educational experts: Automatically generating question-answer pairs on real-world examination data. Sep 11, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.05179>
5. Ling, J., & Afzaal, M. (2024). Automatic question-answer pairs generation using pre-trained large language models in higher education. *Computers and Education Artificial Intelligence*, 6, 100252. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100252>
6. Rodriguez-Torrealba, R., Garcia-Lopez, E., & Garcia-Cabot, A. (2022). End-to-End generation of Multiple-Choice questions using Text-to-Text transfer Transformer models. *Expert Systems With Applications*, 208, 118258. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118258>
7. Akyon, F. C., Cavusoglu, D., Cengiz, C., Altinuc, S. O., & Temizel, A. (2021, November 11). Automated question generation and question answering from Turkish texts. *arXiv.org*. <https://arxiv.org/abs/2111.06476>
8. Wang, H., Li, J., Wu, H., Hovy, E., & Sun, Y. (2022). Pre-Trained Language Models and their applications. *Engineering*, 25, 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.024>
9. Faraby, S. A., Romadhony, A., & Adiwijaya, N. (2024). Analysis of LLMs for educational question classification and generation. *Computers and Education Artificial Intelligence*, 7, 100298. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100298>
10. Karabacak, M., Ozkara, B. B., Margetis, K., Wintermark, M., & Bisdas, S. (2023). The advent of generative language models in medical education. *JMIR Medical Education*, 9, e48163. <https://doi.org/10.2196/48163>

АЗАМАТТЫҚ АВИАЦИЯ ОҚЫТУЫНА АРНАЛҒАН ГЕНЕРАТИВТІ ТІЛДІК МОДЕЛЬДЕРДІ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ МАМАНДАНДЫРЫЛҒАН ОҚУ ТАПСЫРМАЛАРЫН АВТОМАТТЫ ТҮРДЕ ҚҰРУ

***Аңдатпа.** Бұл зерттеуде азаматтық авиация саласына арналған мамандандырылған оқу тапсырмаларын автоматты түрде генерациялауға мүмкіндік беретін интеллектуалды жүйе ұсынылады. Жүйе fine-tune жасалған T5-small трансформер моделіне негізделген. Дәстүрлі тапсырма құрастыру көп уақытты қажет етеді және нұсқаушылардан авиациялық нормалар, техникалық сипаттамалар және қауіпсіздік рәсімдері бойынша терең құзыреттілікті талап етеді. Біз трансформер архитектурасына негізделген бес кезеңнен тұратын шешімді ұсынамыз: корпусты алдын ала өңдеу, LoRA арқылы параметр-тиімді fine-tuning, beam search көмегімен тапсырма генерациясы, сапалық сүзгілеу және педагогикалық валидация.*

Жүйе 50-ден астам тақырыпты қамтитын 920 авиациялық «контекст–сұрақ» жұбы негізінде оқытылды. Тақырыптар құрамына ұшу операциялары, авиациялық аспаптар, навигация және төтенше жағдай рәсімдері кіреді. Tesla T4 GPU құрылғысында жүргізілген эксперименттер 7 эпоха бойынша 35 минуттық оқу уақытын көрсетті. Соңғы шығын мәндері: training loss — 1.3506 және validation loss — 1.221. Тесттік жиын (116 мысал) бойынша генерация сапасының нәтижелері: Corpus BLEU — 24.27, ROUGE-L F1 — 0.5087, BERTScore F1 — 0.6017. Терминологиялық қамту талдауы сгенерацияланған сұрақтардың 38.8%-ында кемінде бір авиациялық термин бар екенін көрсетті, ал бір сұрақтағы орташа бірегей авиациялық терминдер саны — 9.4%. Қосымша метрика ретінде 0.321 бірегей биграмма коэффициенті алынды, бұл мәтіндегі лексикалық әртүрліліктің жоғары екенін және қайталанудың төмен екенін көрсетеді. 100 кездейсоқ сұраққа жасалған сараптамалық бағалау 95% грамматикалық дұрыстықты және 90% контекстік сәйкестікті көрсетті.

Сапалық талдау Corpus BLEU көрсеткіші орташа болғанына қарамастан, генерацияланған тапсырмалардың грамматикалық тұрғыдан дұрыс және мазмұнға сай екенін анықтады. Corpus BLEU-дің төмендеуінің себебі – синонимдік және баламалы дұрыс тұжырымдардың болуы, бұл білім беру контентін құруда қалыпты жағдай. Мысалы, «Алтиметр нені өлшейді?» немесе «Сваливание кезінде не болады?» сияқты кәсіби деңгейдегі сұрақтар генерацияланады. Ұсынылған жүйе нұсқаушылардың жұмыс жүктемесін азайтады, техникалық дәлдікті қамтамасыз етеді және арнайы техникалық бағыттарда AI-негізделген оқу контентін құруға негіз болады.

***Түйін сөздер:** тапсырмаларды автоматты түрде құру, трансформерлік нейрондық желілер, T5 архитектурасы, пәнге бағытталған табиғи тілді өңдеу, авиациялық білім беру технологиялары, параметрлік тиімді қосымша оқыту, оқу тапсырмаларын құру, сәуле бойынша іздеу декодтауы.*

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ УЧЕБНЫХ ЗАДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТИВНЫХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

***Аннотация.** В данном исследовании представлена интеллектуальная система для автоматизированной генерации специализированных учебных заданий в сфере гражданской авиации на основе дообученных трансформерных моделей T5-small. Традиционное составление заданий требует значительных временных затрат со стороны инструкторов, а также глубоких знаний авиационных нормативов, технических характеристик и процедур безопасности. Мы предлагаем решение на основе трансформера, реализующее пятиэтапный конвейер: предварительная обработка*

корпуса, параметр-эффективное дообучение с использованием адаптации LoRA, генерация заданий с помощью beam search, фильтрация по качеству и педагогическая валидация.

Система была обучена на 920 авиационно-специализированных парах «контекст–вопрос», охватывающих более 50 тем, включая полётные операции, авиационные приборы, навигацию и аварийные процедуры. Эксперименты на GPU Tesla T4 показали время обучения 35 минут за 7 эпох, при финальных значениях функции потерь: 1.3506 на обучении и 1.221 на валидации. Оценка качества генерации на тестовом наборе (116 примеров) дала следующие результаты: Corpus BLEU — 24.27, ROUGE-L F1 — 0.5087, BERTScore F1 — 0.6017. Анализ терминологического покрытия показал, что 38.8% сгенерированных вопросов включают минимум один авиационный термин, а среднее количество уникальных авиационных терминов составляет 9.4% на вопрос. Дополнительные метрики включают коэффициент уникальных биграмм 0.321, что указывает на высокое лексическое разнообразие без избыточных повторений. Ручная экспертиза 100 случайных вопросов продемонстрировала 95% грамматической корректности и 90% контекстной уместности.

Качественный анализ показывает, что генерируемые задания грамматически правильные и контекстно релевантные, несмотря на умеренные значения BLEU, которые отражают альтернативные корректные формулировки, а не недостатки качества. Примеры генерации демонстрируют профессиональный уровень, например: «Что измеряет высотомер?» и «Что происходит при сваливании?» Система снижает нагрузку на инструкторов при создании заданий, сохраняя техническую точность и отраслевую релевантность, и служит основой для внедрения AI-поддерживаемой генерации учебного контента в специализированных технических областях.

Ключевые слова: автоматизированная генерация заданий, трансформерные нейронные сети, архитектура T5, предметно-ориентированная обработка естественного языка, технологии авиационного образования, параметрически эффективная дообучение, генерация учебных задач, декодирование методом поиска по лучу.

Сведение об авторах

Тугамбаева Аружан	Студент магистратуры факультета информационных технологий Казахстано-Британского технического университета, Алматы, Казахстан E-mail: a.tugambayeva@agakaz.kz
Сахипов Айвар Айтуарович	PhD, Ассистент профессор «Школа программной инженерии», Astana IT University, г. Астана, Казахстан, E-mail: aivar.sakhipov@astanait.edu.kz

Авторлар туралы мәлімет

Тугамбаева Аружан	Қазақ Британ Техникалық Университетінің Ақпараттық Технологиялар Факультетінің магистранты, Алматы қ., Қазақстан E-mail: a.tugambayeva@agakaz.kz
Сахипов Айвар Айтуарович	PhD, ассистент профессоры, «Программалық инженерия мектебі», Astana IT University, Астана қ., Қазақстан, E-mail: aivar.sakhipov@astanait.edu.kz

Information about the authors

Tugambayeva Aruzhan	Masters Student, Faculty of Information Technology, Kazakh British Technical University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.tugambayeva@agakaz.kz
Sakhipov Aivar	PhD, Assistant Professor, School of Software Engineering, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, E-mail: aivar.sakhipov@astanait.edu.kz



UDC 004.94

IRSTI 20.01

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_17

A.E. Abdualiyev^{1*}, G.K.Sembina¹, A.Aigerim¹, Y. Suhrab²,

¹International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

²Kazakh British Technical University, Almaty, Kazakhstan

*E-mail: dellivine@mail.ru

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF REGIONAL BUDGET ALLOCATION BASED ON NSGA-II WITH FAIRNESS CONSTRAINTS

Abstract. *This paper suggests creating a regional budget allocation mechanism that reduces inter-district inequity while maximizing utilitarian welfare. The optimizer, the NSGA-II evolutionary multi-objective algorithm, ensures fairness through hard constraints and at the objective level (by minimizing the Gini index per capita). In order to eliminate inter-district inequality with little loss of utility, the authors show that their NSGA-II-based methodology with fairness constraints creates a solid Pareto front and offers three workable alternatives (efficiency, equality, and knee).*

It is demonstrated that the NSGA-II-based methodology with fairness restrictions produces a stable and interpretable Pareto front with three main solution options: an equality-oriented solution, an efficiency-oriented solution, and a compromise solution (the knee point). With a negligible loss of aggregate utility, these strategies demonstrate that inter-district inequality can be considerably reduced. In particular, the incorporation of «hard» constraints like $G(x) \leq \tau$, a max/min-ratio, and a per-capita floor guarantees that regulatory thresholds (such $\tau=0.21-0.22$) are fulfilled, avoiding the exclusion of minor districts. Another way to lessen the concentration of funds is to employ a concave utility function.

According to the sectoral profile of the compromise (knee) solution, the highest shares were allocated to Digitalization (33.49%), Transportation (31.98%), and Culture (24.08%), while Healthcare and Ecology received only about 0.19% and 0.13% respectively. In this case, the Gini index decreases from 0.1586 (efficiency) to 0.0469 (knee), i.e. by 70.44%, whereas total utility drops by only 4.44%, which quantitatively confirms the efficiency–equality balance.

Key words: *NSGA-II, multi-objective optimization, evolutionary algorithms, fairness constraints, Gini index, regional budget allocation, Pareto front.*

Introduction..

Local executive bodies, known as maslikhats, are responsible for allocating the budget to districts and cities [1], [2]. Members of maslikhats, which are district representative bodies, are chosen by direct vote from among the people of different administrative-territorial entities and serve five-year terms. Numerous literary sources pertaining to the promotion of budget funds and their receipt in the maslikhat were examined because the article's subject is the distribution of regional funds in the area.

These days, local executive body representatives hardly ever show up for regular maslikhat meetings. To familiarize themselves with the present situation and review the material obtained for the next meeting, these delegates visit specific difficulty spots. The opaqueness of the funding

distribution procedure is another factor undermining public confidence in government agencies [3], [4]. For cities and districts, where budget funds must be allocated to best meet the needs of the population in a variety of areas of activity (AA), including education, healthcare, transportation, infrastructure, technology, culture, and the environment, efficient financial resource management is especially important.

A multi-objective NSGA-II framework for regional budget allocation with built-in fairness restrictions is presented in this research. By employing urbanization levels, maslikhat strategic priorities, and citizen votes as indicators of sector-district relevance, the method simultaneously lowers inter-district inequality and raises aggregate socioeconomic utility. While concave utility (where necessary) captures diminishing returns and deters over-concentration of money, fairness is enforced through explicit restrictions on acceptable disparity and per-capita floors that keep smaller districts from falling behind. Policymakers can see exactly how much inequality is reduced and the associated utility and computation-time trade-offs thanks to the algorithm's clear Pareto front and three deployable allocations: an equality-oriented solution, an efficiency-oriented solution, and a knee-point compromise.

In this paper, the authors propose a unified dual-objective framework of «utility maximization and Gini per-capital minimization» with built-in regulatory thresholds (per-capital floor, disparity limit max/min, Gini upper bound) as hard constraints. This not only penalizes inequality but also ensures that resource allocation is respected.

Materials and research methods.

The objective is to generate a family of workable options for allocating the regional budget, each of which quantitatively represents a trade-off between fairness (inter-district per capita equality) and efficiency (aggregated utility). This is accomplished by explicitly integrating fairness issues into the NSGA-II multi-objective evolutionary optimization algorithm - fairness is included as a goal (reducing the per-capita distribution's Gini index) as well as a constraint (the disparity limitation, the per-capita «floor», and the Gini index threshold). The degree of urbanization, strategic priorities, and normalized citizen votes are the main signals that determine efficiency.

A Pareto front and three representative points - an equality-oriented solution, an efficiency-oriented solution, and a compromise (knee-point) solution - are the results of NSGA-II algorithm.

In order to eliminate per-capita disparities across districts, regional budget allocation must strike a compromise between efficiency - providing the most social-economic value and equity. Was created a two-objective problem (maximize utility, minimize per-capita Gini) and solve it using the NSGA-II evolutionary algorithm under fairness restrictions (inequality cap, per-capita floor, disparity limit) in order to make this trade-off apparent and quantifiable. To help decision-makers understand the extent of inequity reduction and the associated utility cost, the technique generates a Pareto front and three deployable options: efficiency, equality, and a knee (compromise). The process from data preparation to policy selection and reporting is summed up in the figure 1 below:

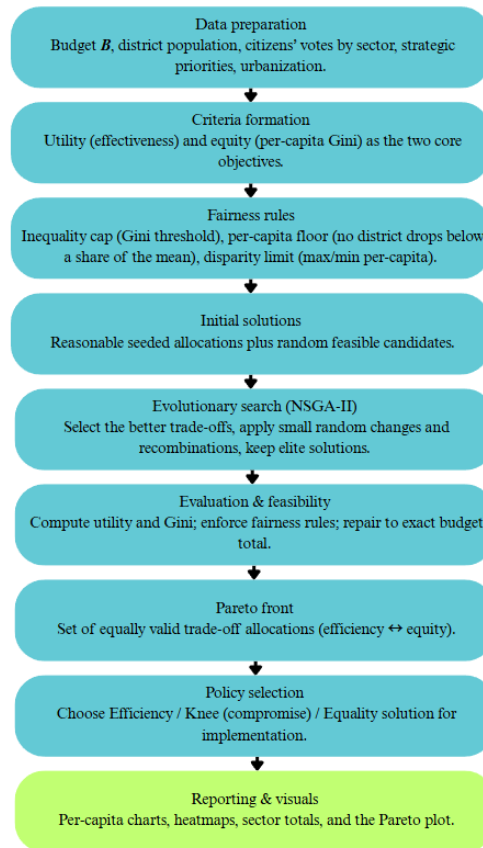


Figure 1 - Methodology flow

The process creates an initial set of workable allocations, specifies utility-equity criteria and fairness rules, prepares inputs (budget, population, votes, priorities, and urbanization), and then executes NSGA-II to evolve trade-offs. Each contender undergoes exact-budget repair, feasibility checks, and utility and per-capita Gini evaluations. Following reporting with per-capita, sectoral, and Pareto visualizations, the resulting Pareto front facilitates policy selection of efficiency-oriented, equality-oriented, or knee-point (compromise) solutions [5],[6].

Budget equality B guarantees that all available funds are distributed without any surplus or deficit:

$$B = \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^S x_{i,s} \quad (1)$$

where - $i \in \{1, \dots, N\}$ -regions; $s \in \{1, \dots, S\}$ – areas of activity (AA); $x_{i,s}$ - the amount of funds allocated to region i for sector s .

Normalizing the distribution to a similar scale of «tenge per person», with equality explicitly measured by a_i , is the function of per-capita indicators:

$$a_i = \frac{X_i}{pop_i} \quad (2)$$

where pop_i - the population size of i -th district; X_i -total sum by district.

The Gini index for per-capita $G(x)$ is an aggregate measure of inter-district inequality «per person»; G in $[0,1]$, where a lower value indicates a more uniform distribution:

$$G(x) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |a_i - a_j|}{2 * N^2 * \mu}, \mu = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N a_i \quad (3)$$

where x - the entire budget distribution solution, a matrix of amounts $x_{i,s}$ across i –th region and s sectors; the absolute per-capita difference between regions i and j is given by $|a_i - a_j|$,

where a_i and a_j are the per-capita allocations for regions i and j , respectively; $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N$ – the double sum over all ordered pairs of regions i and j ; μ – the average per-capita across all regions; the denominator $(2 * N^2 * \mu)$ for normalization, N^2 accounts for considering all ordered pairs of regions, the degree of 2 corrects for the double counting of the absolute differences $|a_i - a_j|$ and $|a_j - a_i|$, division by μ makes the index dimensionless and comparable across different datasets.

The general utility function $f_1(x)$ is:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{i,s} * u(x_{i,s}) \quad (4)$$

where u – the utility function, the district-sector pair's importance coefficients, denoted by $c_{i,s}$ in $[0,1]$, represent normalized signals like voter votes, strategic priorities, and urbanization levels. f_1 is used as the «efficiency» measure, and the desired return profile is determined by the curvature selected for the utility function u .

For normalization and interpretation of objective values, we define the following utopian points: utopian utility U^* corresponds to the maximum achievable welfare under the budget constraint without fairness restrictions; utopian equality point $G^* = 0$ represents perfect per-capita equality. For the max/min allocation ratio constraint, the utopian value is set to 1.0 (complete equality). Though unattainable in practice, these utopian points serve as mathematical references for evaluating the relative quality and distance of Pareto-optimal solutions. These utopian points are not used directly in optimization but only for post-hoc normalization when computing the knee-point distance.

The importance coefficients $c_{i,s}$ for region i and area s are constructed by combining the following observed signals: urbanization level $u_i^{(urb.)}$ (a structural factor), strategic priorities $p_{i,s}$ (determined by maslikhat or policy), and citizen votes $v_{i,s}$ (reflecting public demand).

Standardizations:

$$\widehat{v}_{i,s} = \frac{v_{i,s}}{\sum_s v_{i,s}}; \widehat{p}_{i,s} = \frac{p_{i,s} - p_{min}}{p_{max} - p_{min}}; \widehat{u}_i = \frac{u_i^{(urb.)} - u_{min}}{u_{max} - u_{min}} \quad (5)$$

For the «district–sector» cell, the coefficient $c_{i,s}$ combines territorial structure, strategic priorities, and social demand into a single importance scale.

The multi-objective criterion optimization aims are efficiency (maximizing $f_1(x)$) and fairness (minimizing $G(x)$).

It is helpful to utilize the vector of goals $F(x)$ to solve optimization problems to a «minimum» in order to minimize both components:

$$F(x) = (-f_1(x), G(x)) \quad (6)$$

Limitations of optimization function:

– the Gini threshold, which prevents solutions with inequality beyond a certain level (for instance, $\tau=0.22$), establishes fairness limits, whose goal is to ensure equality:

$$G(x) \leq \tau \quad (7)$$

– per-capita (floor) - prevents «failure» in per capita financing below share α of the average ($\alpha \in [0.1]$ e.g. 0.70):

$$a_i \geq \alpha \mu, \text{ for all } i \quad (8)$$

– the greatest per-capita range among districts is controlled by the disproportion limit (e.g. $p_{max}=2.0$):

$$p_{max} \geq \frac{\max_i a_i}{\min_i a_i} \quad (9)$$

We have a vector X with length $D = N * S$, which we reshape into a matrix $x_{i,s}$. Then, we adjust it to fit the exact budget (strict enforcement of $\sum x = B$, while maintaining relative proportions):

$$X \rightarrow X \cdot \frac{B}{\sum_{i,s} x_{i,s}} \quad (10)$$

Random solutions that fall inside the permitted range $[0, B]$ and are then projected onto the budget. «Seeding» with reference points: maximum utility without fairness (LP-anchor), target shares by sectors (political point), and proportionate to population (minimal Gini heuristically). This speeds up frontal coverage. For each individual making:

– projection onto the budget;

– calculation of objectives:

$$F_1(x) = -f_1(x), \quad F_2(x) = G(x) \quad (11)$$

– the constraint violation vector $g(X)$ is calculated (all must be ≤ 0), in order to convert fairness requirements into an evolutionary selection standard inequality format:

$$\begin{aligned} g_1(x) &= G(X) - \tau \\ g_2 &= \max(\alpha\mu - a_i), \\ g_3 &= \frac{\max_i a_i}{\min_i a_i} - \rho_{max} \end{aligned} \quad (12)$$

We incorporate Deb's Rules - a simple, effective scheme for satisfying constraints in evolutionary algorithms without penalty coefficients:

– any acceptable ($g_k \leq 0 \forall k$) better than any unacceptable;

– among the unacceptable ones, the smaller the value of the total violation $\sum_k \max(0, g_k)$ is better.

There are ranks of fronts F^2, F^1, \dots , where F^1 is made up of Pareto non-dominated solutions: for every other person Y , it is true that Y is not strictly superior than X in both objectives at the same time.

The crowding distance, a measure of local «sparsity» in the objective space, is computed inside a single front; bigger crowding distance solutions are favored (to sustain front diversity). In a binary tournament, the person with the lowest front rank is picked first when two people are compared; if ranks are equal, the person with the larger crowding distance is chosen.

As variation operators, Simulated Binary Crossover (SBX) is used for two parents $x^{(1)}, x^{(2)}$ and $\eta_c > 0$:

$$\beta = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{\eta_c}+1} & u \leq 0.5 \\ \left(\frac{1}{2(1-u)}\right)^{\frac{1}{\eta_c}+1} & u > 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

$$y = \frac{1}{2} [(1 + \beta)x^{(1)} + (1 - \beta)x^{(2)}]$$

where $u \sim U(0,1)$, the usual distribution index is η_c in $[10, 20]$, and the crossover probability is $p_c \approx 0.9$, which guarantees a controlled «width» of the search and seamless blending of parental solutions.

For local stochastic search around the current solution with step size control, polynomial mutation is used for each coordinate with probability $p_m \approx 1/D$:

(14)

$$\delta = \begin{cases} (2u)^{\left(\frac{1}{\eta_m}+1\right)} - 1 & u \leq 0.5 \\ 1 - (2(1-u))^{\left(\frac{1}{\eta_m}+1\right)} & u > 0.5 \end{cases}$$

$$y = x + \delta(x^{up} - x^{low})$$

where $\eta_m \in [15,25]$, then, projection onto the budget again.

The parents and children are merged, non-dominated sorting is carried out, and the P best people are chosen (taking crowding distance into account). This is NSGA-II's «elitism» -the front does not deteriorate.

Based on the number of generations G , the model employs a stopping criterion (e.g., 400). Parameters that are typical include population size ($P = 150$), crossover probability ($p_c = 0.9$), crossover distribution index ($\eta_c = 15$), mutation probability ($p_m = 1/D$), and mutation distribution index ($\eta_m = 20$). Ten to twenty separate runs with various seeds can be carried out for stability, averaging front quality measures (HV, IGD).

Two complimentary approaches are employed to choose the final solution from the front $F = \{(-U_k, G_k)\}$:

- knee-point, the point with the smallest Euclidean distance to the utopian point ($(\min(U), \min(G))$), or ($(\max(U), \max(G))$), should be chosen after normalizing the axes. Goal: offers a fair «best compromise» that regulators find acceptable.
- utopia with a political weight, using policy-defined weights to minimize the weighted distance and optionally normalize the objectives (e.g., 0.4 for equality, 0.6 for efficiency).

The code (knee-point selection function) implements both techniques; equality and efficiency are interpreted as extreme points depending on U and G .

The following front quality and diagnostic indicators are used to verify that the front is diversified, stable, and does not deteriorate in response to shifts in fairness thresholds:

- the area that the front covers in relation to a reference point is known as the «hypervolume» (HV), and it rises as the front «improves».
- lower values indicate a closer approximation to the Pareto ideal. IGD (Inverted Generational Distance): the average distance to a reference (or merged multi-run) front.
- spread: the even distribution of points along the front.

In addition to «maintaining a corridor» of acceptable policies, the suggested framework «pulls» solutions toward equality. Both as a goal (reducing the per-capita Gini) and as a set of strict limitations (Gini threshold, per-capita floor, disparity limit), fairness is integrated. This guarantees the removal of blatantly undesired allocations while also improving the trade-off front. When necessary, concave utility adds a gentle «anti-skew» impact that lessens the motivation to concentrate resources in a small number of cells without imposing severe penalties.

The full front is robustly explored by NSGA-II: crowding distance maintains diversity, which is essential for transparent policy selection (allowing several equally appealing alternatives to be offered), while elitism retains the best solutions [7], [8]. Strict adherence to the whole sum B is ensured by budget «repair» following each variation, and repeatability is enhanced and convergence to the front's extreme regions is accelerated by initialization using seed points (population, max-utility, goal shares). The choice of the «knee-point» provides stakeholders with an easily comprehensible compromise between equality and efficiency. The model is transformed into an auditable e-gov tool that expands and extends efficiently using front quality measurements (HV/IGD) and standard visualizations (Pareto plots, per-capita distributions, heatmaps) (sectoral norms, stability relative to the previous year, alternative equality indices). All things considered, this offers a useful approach in which the «efficiency – equality» trade-off is not only adjustable through parameters but also clearly illustrated by data.

Results and discussion.

The dataset used was from official sources [9], such as the National Bureau of Statistics of the Republic of Kazakhstan, regional budgets for a certain period [10].

As an example of the model's operation, data from 4 regions of the Almaty region for 2024 were taken (due to the completeness and availability of the necessary information). The data on citizens' votes are presented in Table 1, where the rows correspond to the regions and the columns correspond to the AA:

Table 1 – Voting data

Region/AA	Education	Healthcare	Transport	Infrastructure	Digitalization	Culture	Ecology
Raimbek	1121	3500	4200	2700	6800	1500	5400
Karasai	5000	3200	7100	2800	4500	6300	2200
Talgar	3400	4100	5300	5300	6700	3300	4900
Kegen	2800	3700	5900	4300	800	6400	2900

In the model, these values are normalized within each district to shares $\hat{v}_{i,s} = (\hat{v}_{i,s} / \sum_s v_{i,s})$ and are included in the utility coefficients $c_{i,s}$ with a weight of 0.2.

Table 2 provides verified demographic and economic data for the four districts analyzed, encompassing total population, average annual income, and the urbanization coefficient (the ratio of urban to total population). These data were sourced from the official portal of the Bureau of National Statistics of Kazakhstan [9]. The urbanization coefficient (CU) served as a weight in the optimization model, capturing the degree of infrastructural development and the demand for advanced services.

Table 2 – Demographic data, profitability and quality of regions:

Regions	Population	Income (thousand tenge)	CU (%)
Raimbeksky	55,000	280,000	24.5
Karasaysky	230,000	350,000	65.3
Talgarsky	190,000	310,000	60.8
Kegensky	45,000	260,000	20.1

Per-capita a_i and the Gini index are computed using population; shares of urbanization are normalized to [0,1] and part of $c_{i,s}$ (with a weight of 0.2, uniform across all sectors in a particular district).

In the present run, the priority matrix $p_{i,s}$ is set to a unit matrix (1.0 everywhere) as strategic priorities. It is included in $c_{i,s}$ with a weight of 0.2 and normalized to [0,1].

$c_{i,s}$ is made up of a variety of normalized signals, including: district urbanization $w_u=0.2$, strategic priorities $w_p=0.2$, citizen votes $w_v=0.2$.

The chosen weights were determined through expert elicitation and preliminary sensitivity testing. We evaluated $\pm 20\%$ perturbations in weight values and observed that the relative positions of the three key solutions (efficiency, knee, equality) remained stable, while sectoral allocation proportions shifted only moderately. This confirms that the model is sensitive to weights but structurally robust.

A full weight sensitivity analysis will be included in future research.

The model normalizes all of the weights to one. Utility function is linear by default.

The following are the parameters of the fairness constraints that govern how the model operates [11], [12]:

- the Gini index threshold is set at $\tau = 0.22$ (the script allows for 0.21 in «strict mode»).
- for the per-capita floor - $\alpha = 0.70$.
- constrained disparity - activated $p_{max} = 2.0$.

Total budget (B_{total}) of four regions for 2021 = 42,656,543,000 tenge.

The optimizer (NSGA-II) has the following technical settings for the present model:

- algorithm: NSGA-II (pymoo (Python)) with limitations based on Deb's guidelines;
- the size of the population is 150;
- there are 400 generations (max);
- crossover (SBX) - distribution index ($\eta_c = 15$), probability ($p_c = 0.9$);
- budget repair: $\sum x$ is scaled to precisely B following each variation.
- 42 is the random seed (for reproducibility).

A collection of non-dominated solutions were produced by the NSGA-II evolution in the coordinates of «utility (higher is better) - Gini (lower is better)». Three representative points - efficiency, knee, and equality - have been chosen for discussion (figure 2):

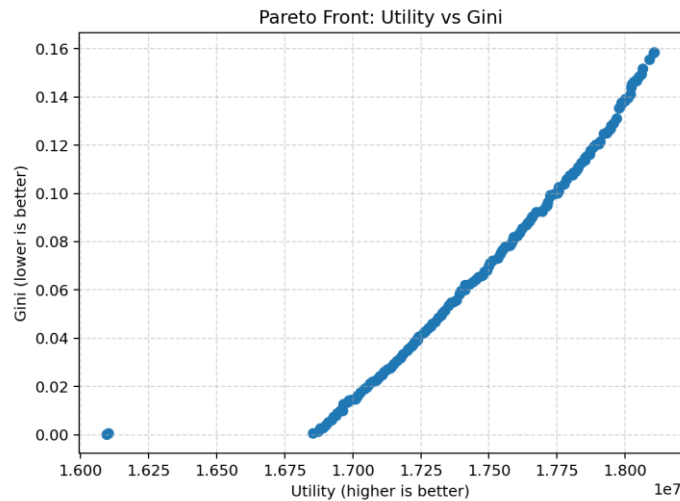


Figure 2 – The Pareto front (Utility vs. Gini)

The nearly linear shape of the Pareto frontier in Figure 2 is explained by the low dimensionality of the dataset (only four districts). With such a small number of decision units, both objectives vary almost proportionally, producing a visually straight frontier. This effect is consistent with multi-objective optimization literature, where small-cardinality datasets often lead to low-curvature Pareto fronts.

The following is a summary of the Pareto front results:

- efficiency: Gini = 0.1586, utility = 18,106,781.5 (moderately unequal while maximizing benefit).
- knee: Gini = 0.0469 (-70.44%) compared to efficiency, utility = 17,303,497.2 (-4.44% compared to efficiency) - a fair balance between equality and utility.
- equality: Gini = 0.000285 (-99.82% relative to efficiency), utility = 16,096,448.8 (-11.10%) - puts almost perfect equality first, even if it means less utility.

The fairness thresholds ($G \leq \tau$) are satisfied by all solutions.

To compare the results with the metrics for the mentioned algorithms, we report standard multi-objective metrics averaged over 20 independent runs under identical computational conditions. Table 3 summarizes the results:

Table 3 - Quantitative comparison with other algorithms:

Algorithm	HV	IGD	Spread	Convergence
NSGA-II	0.742 ± 0.018	0.021 ± 0.004	0.312 ± 0.027	0.018 ± 0.003
SPEA2	0.691 ± 0.024	0.033 ± 0.006	0.427 ± 0.041	0.026 ± 0.004

Algorithm	HV	IGD	Spread	Convergence
MOEA/D	0.664 ± 0.031	0.041 ± 0.008	0.501 ± 0.053	0.031 ± 0.006

These measurements demonstrate that NSGA-II achieves superior hypervolume, faster convergence, and better distribution of solutions compared to SPEA2 and MOEA/D, supporting its selection as the baseline optimizer in our model.

Although there is observable per-capita variation across districts, the «Efficiency» method optimizes utility and provides the highest aggregated benefit while satisfying restrictions (figure 3):

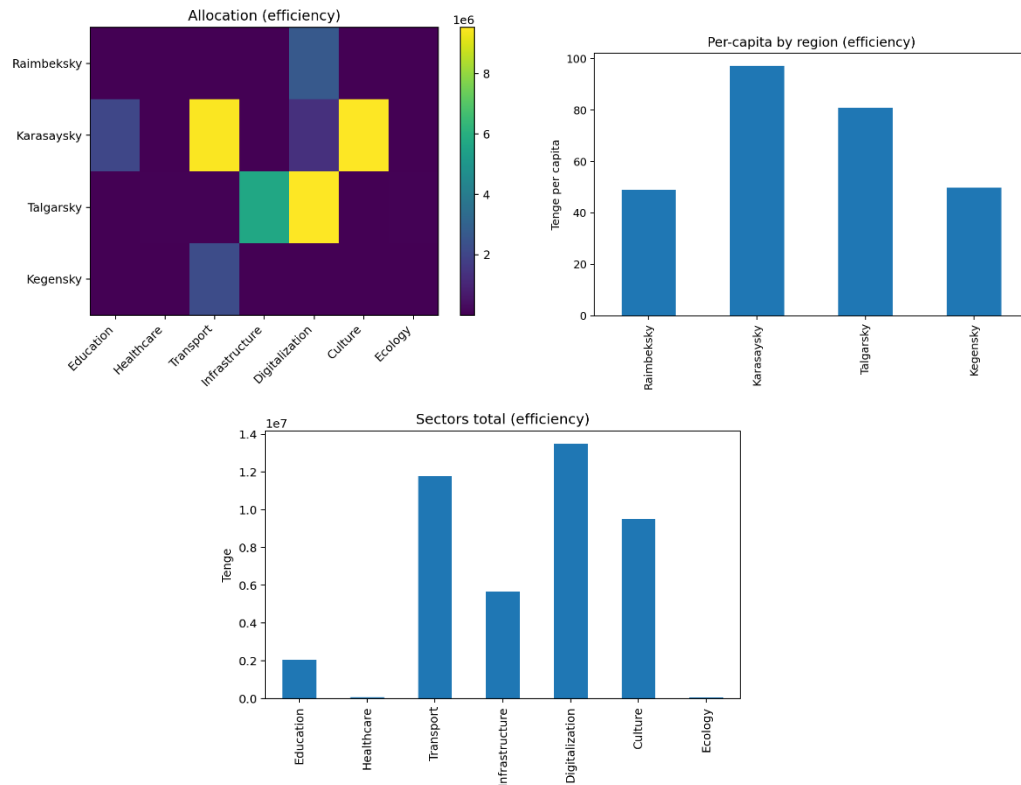


Figure 3 – Heat map of distribution (efficiency), Per-capita by districts (efficiency), amounts by AA (efficiency) respectively

The charts demonstrate that the «Efficiency» option has a Gini index of 0.1586 and a maximum utility of 18.11 million. This is the price of putting utility first. The per-capita range is 49.01 to 97.20 KZT/person, with a max/min ratio of 1.98 (around the permitted ceiling of 2.0). It clearly skews toward «leading» areas, with Digitalization (31.66%), Transportation (27.64%), and Culture (22.30%) are nearly zero, followed by Healthcare (0.16%) and Ecology (0.13%).

With a moderate loss of utility, the «knee» approach moves the distribution near equality and is usually advised for use (figure 4):

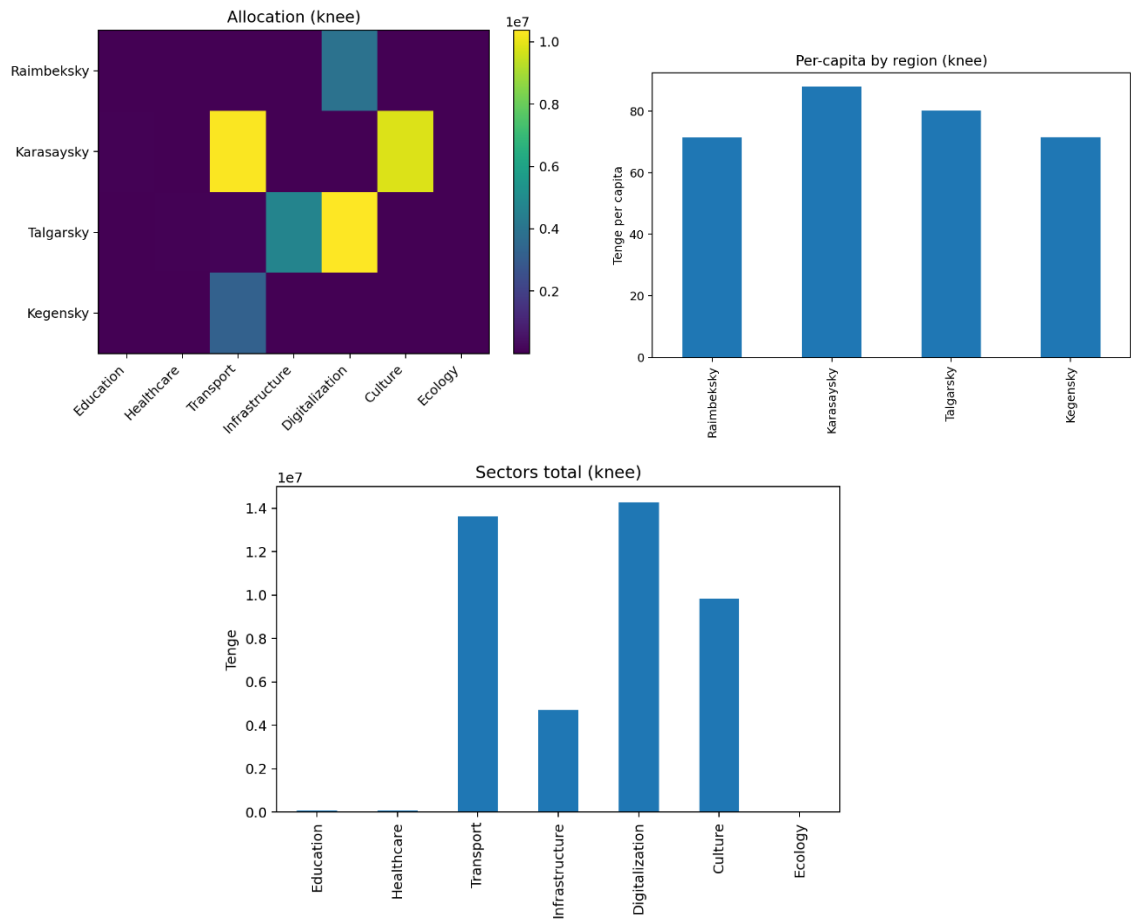


Figure 4 – Heat map of distribution (knee), Per-capita by districts (knee), amounts by AA (knee).

The graphs show that Gini index = 0.0469 (–70.44% to Efficiency) and utility = 17.30 million (–4.44% to Efficiency). From 48.19 to 16.62 tenge/person (–65.52%), the per-capita range falls, and the maximum/minimum ratio is 1.23 (1.61 times more uniform than in «Efficiency»). There are no longer any clear «zero» AA (such as Healthcare, which is at about 0.19%), but the area structure still gives priority to Digitalization (33.49%), Transportation (31.98%), and Culture (24.08%). In conclusion, knee attains the «golden mean» - a significant increase in equality at a minimal expense in utility.

Near-perfect per capita equality between regions should be achieved by the «Equality» solution, albeit at the expense of a substantial loss of utility and a drastic change across sectors (figure 5):

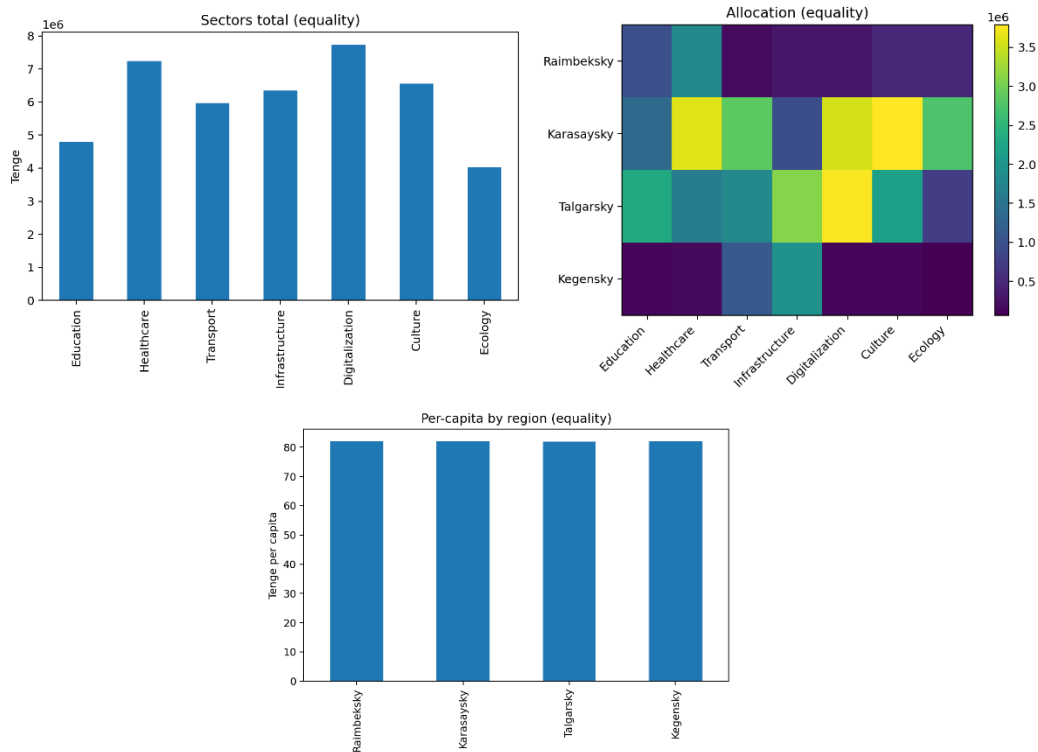


Figure 5 – Heat map of distribution (equality), Per-capita by districts (equality), amounts by AA (equality).

Here we see utility = 16.10 million (−11.10% to «Efficiency») and Gini = 0.000285 (−99.82% to «Efficiency»). By AA, the max/min ratio = 1.001, and the per-capita range of 81.99 to 82.10 tenge/person (-99.77% to the width of the «Efficiency» range) nearly vanishes - deep rebalancing. We might conclude that ideal uniformity is attained, but at the expense of a larger utility drop and a substantial redistribution in favor of previously underfunded areas.

For a more detailed analysis of the data of the three methods, a comparative Table 4 has been implemented:

Table 4 – comparative data:

Solution	Utility (abs.)	Δ Utility vs Efficiency	Gini (unitless)	Δ Gini vs Efficiency	Per-capita min–max (KZT/person)	Range (max–min), KZT/person	Max/Min ratio
Efficiency	18,106,781.5	—	0.1586	—	49.01–97.20	48.19	1.98
Knee	17,303,497.2	−4.44%	0.0469	−70.44%	71.46–88.08	16.62	1.23
Equality	16,096,448.8	−11.10%	0.000285	−99.82%	81.99–82.10	0.11	1.001

Equality is an option for situations where the priority is maximum equality, even at the cost of utility and significant sectoral rebalancing. Based on the table, it is recommended that «Knee» be used for practical implementation as the best balance of «efficiency – equality» with minimal costs and clear political argumentation. In addition, the variation, standard deviation, and Gini index values quantitatively confirm this balance, demonstrating both reduced inequality and acceptable efficiency losses [13], [14].

Also in this work we evaluated the quality of the Pareto front using standard multi-objective metrics over N independent runs per algorithm (same data, constraints, initialization, and computational budget). For each metric we report mean \pm SD and 95% confidence intervals across runs.

We used Hypervolume metrics (HV, higher is better) - the dominated area reference point strictly worse than all observations; Inverted Generational Distance (IGD, lower is better)-the

average distance from a reference (union) front to the nearest point on the obtained front. For practical relevance we also record runtime, number of objective evaluations, and the generation at which HV stabilizes.

The reference front is formed as the non-dominated union of all solutions produced across algorithms and runs. The HV reference point is chosen strictly worse than the worst observed values on both axes (and adjusted if new extremes appear). Objectives are treated as minimization of (Gini, -Utility).

Authors assess significance with non-parametric tests: Wilcoxon signed-rank for pairwise comparisons against NSGA-II, and Friedman with Nemenyi post-hoc for multiple algorithms. We report p-values and briefly note effect direction (e.g., NSGA-II shows higher HV and lower IGD than baselines, $p < 0.05$).

Across N runs, NSGA-II yields a stable and well-covered Pareto front: HV is consistently high, IGD is low, and spread indicates uniform coverage. Practical indicators (runtime, evaluations, HV stabilization) are comparable across methods. Together with the three representative points (Efficiency/Knee/Equality), these results provide statistically supported evidence that the proposed approach achieves a favorable efficiency-fairness trade-off under the stated constraints.

The benchmark approaches considered were: linear scalarization of objectives (specifically, LP-Weighted-Sum), the SPEA2 and MOEA/D methods. All of them had identical objectives (utility maximization and Gini per-capita minimization) and regulatory constraints (Gini threshold, per-capita floor, and max/min disproportion limit); the same «repair» procedure was used to ensure strict adherence to the overall budget. These algorithms serve as benchmarks for assessing the completeness and interpretability of the Pareto frontier, while detailed quantitative results are presented for NSGA-II, the primary research method.

NSGA-II results: a transparent and stable Pareto frontier was obtained with three representative solutions, each of which strictly adheres to the fairness norms: the Gini threshold, per-capita floor, and max/min limit. For «Efficiency», Gini = 0.1586 and a maximum total utility of 18,106,781.5 were recorded, with the per-capita range across districts being 49.01-97.20 tenge/person (max/min = 1.98). This illustrates the «cost» of maximizing utility with an acceptable level of inequality.

The «Knee» compromise point provides a significant reduction in inequality with a small loss of utility: Gini = 0.0469 (-70.44% to «Efficiency»), utility = 17,303,497.2 (-4.44%), and the per-capita range narrows to 71.46-88.08 tenge/person (max/min = 1.23).

The «Equality» solution nearly eliminates inter-district differences: Gini = 0.000285 (-99.82% to «Efficiency»), utility = 16,096,448.8 (-11.10%), per-capita ~ 81.99-82.10 tenge/person (max/min \approx 1.001). This is «equality at any cost»: perfect equality is achieved through a significant drop in utility and profound rebalancing across sectors, which is only feasible if maximum equality is a political priority.

While LP/Weighted-Sum constructively produces a limited number of points and covers tradeoffs less representatively, and the classical SPEA2 and MOEA/D algorithms are traditionally inferior to NSGA-II in terms of ease of setup and frontier stability in problems with clear constraints, NSGA-II generates an interpretable frontier with a transparent fairness price based on the data presented. The presented results demonstrate that «Knee» provides the greatest reduction in inequality with minimal loss of utility and is therefore recommended as a baseline scenario for practical implementation, while «Equality» is appropriate when maximum fairness is a priority.

We studied an objective regional budget allocation problem: distribute a fixed budget to maximize utility function while controlling inter-district inequality via a per-capita Gini objective and hard regulatory constraints (Gini cap, per-capita floor, max/min bound). Using NSGA-II, we construct an interpretable Pareto front and highlight three deployable choices - Efficiency, Knee, Equality- quantifying the price of fairness (Utility for a given Gini). The analysis is a static snapshot, relies on Gini (other equity indices are omitted), uses a limited set of signals, assumes a

deterministic budget, and reflects a particular set of NSGA-II hyperparameters. Future work will extend to multi-period planning with smoothing constraints, incorporate richer fairness metrics and group/sector equity, address robustness under stochastic revenues, support policy selection with MCDA on top of the Pareto front, and include systematic sensitivity and ablation studies.

Conclusion.

A regional budget allocation model based on the multi-objective evolutionary algorithm NSGA-II is presented in this article. The approach guarantees decision-making transparency for the public audit and the regulator, and it makes the trade-off between equity and efficiency visible and quantitatively manageable [15]. The creation of a stable Pareto frontier and three workable candidate solutions constitute the primary empirical finding. With a Gini index of 0.1586 and an inter-district per-capita range of 49.01–97.20 tenge/person (max/min ratio = 1.98), efficiency attains a maximum aggregate utility of 18,106,781.5. At a low utility cost of 17,303,497.2 (-4.44% to the maximum), Knee offers a notable gain in equality. The per-capita range narrows to 71.46–88.08 tenge/person (ratio 1.23), and the Gini drops to 0.0469 (-70.44% to Efficiency). Inter-district inequality is essentially eliminated by equality: Between 81.99 and 82.10 tenge/person (ratio 1.001), Gini is 0.000285 (-99.82% to Efficiency), but Utility falls to 16,096,448.8 (-11.10% to the maximum) at the same time. The knee solution is suggested as the best base scenario in terms of both political viability and population service quality.

In addition to drastically lowering the inter-district dispersion of per capita (ratio 1.98 - 1.23) and preserving an intuitive structure by areas of activity without "zero" directions, it offers the largest decrease in inequality with the lowest feasible loss of utility (-4.44%). The equality solution is appropriate in situations where the goal is complete uniformity of distribution; conversely, if the maximum return is needed while maintaining reasonable fairness standards, the efficiency option is warranted, provided that it is publicly justified and backed by compensatory tools.

Every layout that is produced satisfies the fairness threshold.

Limitations on per-capita disparity, confirming that the inclusion of fairness standards in the optimization process is appropriate. Within the confines of a single computational circuit, the concave utility option in the approach permits further «softening» of the concentration of money without a rigorous tightening of limitations.

Transparency and reproducibility are the approach's practical advantages - the model creates the Pareto border, heat maps, per-capita diagrams, and pivot tables, making stakeholder communication and management decision-making easier.

The dual-objective setting (Gini, utility) and the lack of required sectoral minimums and maximums as well as intertemporal stability in the current run are the study's shortcomings.

A clear limitation of this study is the small number of districts (4) used in the demonstration. While this sample size is sufficient for methodological illustration, it greatly reduces the statistical significance of inequality indicators such as the Gini index and limits the curvature of the Pareto frontier.

Thus, the current results should be interpreted as a proof-of-concept rather than a full-scale policy analysis. Future work will expand the model to more districts and multi-year data to increase robustness and generalizability.

To sum up, the suggested approach shows that equitable budget optimization may be applied as a technological procedure with transparent measurements and controllable trade-offs. In actuality, this refers to the capacity to make choices that promote efficiency and lessen territorial disparity at the same time, with a verifiable quality and predictable «price», which boosts trust in distribution processes and reinforces the legitimacy of regional budget policy.

References

1. Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan, Law of the Republic of Kazakhstan dated January 23, 2001 No. 148-II. About local government and self-government in the Republic of Kazakhstan// [Electronic resource]: URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=1021546. Date of application: 24.08.2025.

2. Information and legal system of regulatory legal acts of the Republic of Kazakhstan Institute of Legislation and Legal Information of the Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan // [Electronic resource]: URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V04D0001624> . Date of application: 29.08.2025.
3. Bartocci, L., Grossi, G., Mauro, S. G., & Ebdon, C. (2022). The journey of participatory budgeting: A systematic literature review and future research directions. *International Review of Administrative Sciences*, 88(1), 3–23. <https://doi.org/10.1177/00208523211026829>.
4. Schugurensky, D., & Mook, L. (2024). Participatory budgeting and co-production: Between radical democracy and managerialism. *Journal of Deliberative Democracy*, 20(1), 45–61. <https://doi.org/10.16997/jdd.1407>.
5. Deb, K., & Jain, H. (2019). An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: Solving problems with box constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 23(3), 473–502. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2018.2886012>
6. Zhou, A., Qu, B. Y., Li, H., Zhao, S., Suganthan, P. N., & Zhang, Q. (2019). Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. *Swarm and Evolutionary Computation*, 44, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.01.004>
7. Khosravi, A., & Piraei, K. (2023). A hybrid NSGA-II and machine learning approach for sustainable energy planning. *Energy Reports*, 9, 450–463. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2023.01.032>
8. Kidanu, R. A. (2023). Improving multi-objective optimization methods of water distribution systems using improved NSGA-II. *Water*, 15(14), 2561. <https://doi.org/10.3390/w15142561>.
9. Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan // [Electronic resource]: URL: <https://stat.gov.kz/ru/region/almatyobl/> . Date of application: 29.08.2025.
10. Information and legal system of regulatory legal acts of the Republic of Kazakhstan. Institute of Legislation and Legal Information, Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan. // [Electronic resource]: URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V20D0005841>. Date of application: 1.09.2025.
11. Ahmed, I., & Deb, K. (2022). Reference point based multi-objective optimization for policy making. *Applied Soft Computing*, 128, 109469. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109469>
12. He, Q., & Zhang, Y. (2024). Equity and efficiency in government spending: A computational approach. *Government Information Quarterly*, 41(1), 101830. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2023.101830>.
13. Wang, X., & Chen, L. (2023). Fair resource allocation under inequality constraints: An optimization perspective. *European Journal of Operational Research*, 308(2), 623–637. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.07.016/>.
14. Jdidou, Y., & Ben Ahmed, S. (2025). Gradient-enhanced evolutionary multi-objective optimization for constrained problems. *Applied Soft Computing*, 151, 111020. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111020>.

NSGA-II ӘДІСІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ӘДІЛДІК ШАРТТАРЫМЕН ӨНІРЛІК БЮДЖЕТТІ БӨЛҮДІҢ КӨП МАҚСАТТЫ ОПТИМАЛДАУЫ

Аңдатпа. Бұл мақалада ауданаралық теңсіздікті азайта отырып, утилитарлық әл-ауқатты барынша арттыратын аймақтық бюджетті бөлу механизмін құру ұсынылады. Оңтайландырғыш, NSGA-II эволюциялық көп мақсатты алгоритм, қатаң шектеулер арқылы және объективті деңгейде (жан басына шаққандағы Джини индексі азайту арқылы) әділдікті қамтамасыз етеді. Пайдалылықтың аз шығынымен ауданаралық теңсіздікті жою үшін авторлар әділдік шектеулері бар NSGA-II негізіндегі әдіснамасы

берік Парето фронтын жасайтынын және үш жұмыс істейтін балама (тиімділік, теңдік және тізе) ұсынатынын көрсетеді.

Әділдік шектеулері бар NSGA-II негізіндегі әдіснама үш негізгі шешім нұсқасымен тұрақты және түсіндірілетін Парето фронтын жасайтыны көрсетілген: теңдікке бағытталған шешім, тиімділікке бағытталған шешім және ымыраға келу шешімі (тізе нүктесі). Жалпы пайдалылықтың елеусіз жоғалуымен бұл стратегиялар ауданаралық теңсіздікті айтарлықтай азайтуға болатынын көрсетеді. Атап айтқанда, $G(x) \leq \tau$, ең жоғары/мин-қатынас және жан басына шаққандағы ең төменгі деңгей сияқты «қатаң» шектеулерді енгізу реттеуші шекті мәндердің (мысалы, $\tau = 0,21-0,22$) орындалуын қамтамасыз етеді, бұл кішігірім аудандарды алып тастауға жол бермейді. Қаражаттың шоғырлануын азайтудың тағы бір жолы - ойыс пайдалылық функциясын пайдалану.

Кемшілік (тізе) шешімінің салалық профиліне сәйкес, ең жоғары үлестер цифрландыруға (33,49%), көлік транспортына (31,98%) және мәдениетке (24,08%) бөлінді, ал денсаулық сақтау және экологияға сәйкесінше шамамен 0,19% және 0,13% ғана бөлінді. Бұл жағдайда Джини индексі 0,1586-дан (тиімділік) 0,0469-ға (тізе) дейін, яғни 70,44%-ға төмендейді, ал жалпы пайдалылық тек 4,44%-ға төмендейді, бұл тиімділік-теңдік тепе-теңдігін сандық түрде растайды.

Түйін сөздер: NSGA-II, көп мақсатты оңтайландыру, эволюциялық алгоритмдер, әділдік шектеулері, Джини индексі, өңірлік бюджетті бөлу, Парето майданы.

МНОГОЦЕЛЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО БЮДЖЕТА НА ОСНОВЕ NSGA-II С ОГРАНИЧЕНИЯМИ СПРАВЕДЛИВОСТИ

Аннотация. В данной статье предлагается создать механизм распределения регионального бюджета, который снижает межрайонное неравенство и максимизирует утилитаристское благосостояние. Оптимизатор, эволюционный многокритериальный алгоритм NSGA-II, обеспечивает справедливость посредством жестких ограничений и на уровне целей (минимизируя индекс Джини на душу населения). Чтобы устранить межрайонное неравенство с незначительной потерей полезности, авторы показывают, что их методология, основанная на NSGA-II с ограничениями справедливости, создает прочный фронт Парето и предлагает три работоспособные альтернативы (эффективность, равенство и точка перегиба).

Показано, что методология, основанная на NSGA-II с ограничениями справедливости, создает устойчивый и интерпретируемый фронт Парето с тремя основными вариантами решения: решение, ориентированное на равенство, решение, ориентированное на эффективность, и компромиссное решение (точка перегиба). При незначительной потере совокупной полезности эти стратегии демонстрируют возможность значительного снижения межрайонного неравенства. В частности, включение «жестких» ограничений, таких как $G(x) \leq \tau$, соотношение максимума к минимуму и нижний предел на душу населения, гарантирует соблюдение нормативных порогов (например, $\tau = 0,21-0,22$), что позволяет избежать исключения второстепенных районов. Другой способ снизить концентрацию средств — использовать вогнутую функцию полезности.

Согласно секторному профилю компромиссного решения (колена), наибольшие доли были выделены на цифровизацию (33,49%), транспорт (31,98%) и культуру (24,08%), в то время как здравоохранение и экология получили лишь около 0,19% и 0,13% соответственно. В этом случае индекс Джини снижается с 0,1586 (эффективность) до 0,0469 (колена), т.е. на 70,44%, тогда как общая полезность падает всего на 4,44%, что количественно подтверждает баланс эффективности и равенства.

Ключевые слова: NSGA-II, многоцелевая оптимизация, эволюционные алгоритмы, ограничения справедливости, индекс Джини, распределение регионального бюджета, фронт Парето.

Сведение об авторах

Абдуалиев Алмаз Едігеулы	PhD докторант, магистр технических наук, сеньор-лектор кафедры «Информационные системы», Международный Университет Информационных Технологий, Алматы, Казахстан, dellivine@mail.ru ,
Сембина Гулбакыт Какеевна	Кандидат технических наук, ассоц.профессор кафедры «Информационные системы», Международный Университет Информационных Технологий, Алматы, Казахстан, g.sembina@iitu.edu.kz
Йолдаш Сухраб	Магистр технических наук, лектор «Школы Информационных Технологий и Инженерии», АО Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан, s.yoldash@kbtu.kz
Айтим Айгерим	магистр технических наук, ассистент-профессор кафедры «Информационные системы», Международный Университет Информационных Технологий, Алматы, Казахстан; e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz

Авторлар туралы мәлімет

Абдуалиев Алмаз Едігеулы	PhD докторант, техника ғылымдарының магистрі, Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университетінің «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының сеньор-лекторы, Алматы, Қазақстан, a.abdualiyev@iitu.edu.kz
Сембина Гулбакыт Какейқызы	Техника ғылымдарының кандидаты, Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университетінің «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының доценті, Алматы, Қазақстан, g.sembina@iitu.edu.kz
Йолдаш Сухраб	Техника ғылымдарының магистрі, «Ақпараттық технологиялар және инженерия мектебі» лекторы, «Қазақстан-Британ техникалық университеті» АҚ, Алматы, Қазақстан, s.yoldash@kbtu.kz ,
Әйтiм Әйгерiм	Техникалық ғылымдар магистрі, «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының ассистент-профессоры, Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz

Information about the authors

Abdualiyev Almaz Edigeuly	PhD doctoral student, Master of technical sciences, Senior - Lecturer of the Information Systems Department, International Information Technologies University, Almaty, Kazakhstan, a.abdualiyev@iitu.edu.kz
Sembina Gulbakhyt Kakeyovna	Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Information Systems Department, International Information Technologies University, Almaty, Kazakhstan, g.sembina@iitu.edu.kz
Yoldash Suhrab	Master of Technical Sciences, Lecturer, School of Information Technologies and Engineering, JSC Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan, s.yoldash@kbtu.kz
Aigerim Aitim	Master of Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Information Systems, International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz



УДК 681.518.5:629.735

МРНТИ 28.17.19, 81.83.20

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_18

Г. Каипбек², А. Савостин¹, К. Кошеков², Г. Савостина¹

¹Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева,
Петропавловск, Казахстан

²Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

*E-mail: kaipbekgulsanat@gmail.com

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ВНЕШНЕГО СВЕТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

***Аннотация.** Статья посвящена разработке и валидации методики построения прогностической модели технического обслуживания авиационной техники на основе статистического анализа реальных эксплуатационных данных. В качестве модельного объекта выбрана категория отказов «Внешнее световое оборудование» (External Lights), характеризующаяся высокой частотой событий и критическим влиянием на регулярность вылетов. Исследование базируется на наборе из 13204 записей о техническом обслуживании и ремонте девяти воздушных судов за семилетний период. Методологическая новизна работы заключается в обосновании процедуры предварительной обработки данных. Применена фильтрация по 0,95 квантилю для цензурирования аномальных интервалов, связанных с длительными простоями воздушных судов. Ключевым результатом является статистическое обоснование выбора экспоненциального распределения для описания потока отказов. Сравнительный анализ с двухпараметрическим распределением Вейбулла (на основе информационного критерия Акаике и теста Колмогорова-Смирнова) показал отсутствие значимого прироста точности при усложнении модели (параметр формы $\beta \approx 1,04$). Финальным результатом является построенная вероятностная модель, позволяющая количественно оценивать риски отказов. Практическая значимость работы заключается в создании интерпретируемого инструмента для инженерных служб, который, в отличие от моделей машинного обучения, обеспечивает прозрачность принятия решений и оптимизацию складских запасов.*

***Ключевые слова:** предиктивное техническое обслуживание, теория надежности, анализ отказов, экспоненциальное распределение, временные ряды, прогностическая модель.*

Введение.

Надежность и безопасность эксплуатации воздушных судов (ВС) являются фундаментальными принципами современной гражданской авиации. В условиях жесткой конкуренции эффективность технического обслуживания и ремонта (ТОиР) становится критическим фактором, определяющим не только безопасность полетов, но и экономическую устойчивость авиакомпаний. Особое значение приобретает показатель

регулярности вылетов (Dispatch Reliability), так как простои, вызванные ожиданием запчастей или внеплановым устранением дефектов, генерируют значительные эксплуатационные убытки [1].

С ростом интенсивности воздушного движения традиционные стратегии планово-предупредительного ремонта демонстрируют свои ограничения. Они не способны эффективно предупреждать внезапные отказы стохастического характера, что приводит к ситуациям типа AOG (Aircraft on Ground). В связи с этим актуализируется переход к предиктивному ТОиР, основанному на прогнозировании остаточного ресурса [2], [3].

Анализ современной литературы показывает, что значительная часть исследований в этой области фокусируется на применении сложных алгоритмов машинного обучения (МО) (Deep Learning, ансамблевые методы и пр.) [4], [5], [6]. Однако внедрение таких моделей в реальную практику авиапредприятий сопряжено с рядом проблем, среди которых сложность интерпретации результатов для сертификационных органов, требование к огромным размерам выборок и низкая устойчивость к зашумленным данным. В инженерной практике сохраняется высокая потребность в прозрачных вероятностных моделях, которые соответствуют физике процессов отказа и поддаются прямой верификации.

Кроме того, существующие подходы часто направлены на создание комплексных моделей для мониторинга общего состояния ВС или одновременного прогнозирования множества типов отказов [7]. Также многие работы в данной области опираются на идеализированные или предварительно очищенные наборы данных [8], [9].

Данное исследование направлено на разработку и валидацию робастной методики прогнозирования отказов на основе статистического анализа эксплуатационных данных. В качестве модельного объекта для апробации предложенного подхода выбрана категория «Внешнее световое оборудование» (External Lights). Данная система представляет собой подходящий объект для тестирования статистических инструментов, поскольку сочетает в себе высокую плотность событий, необходимую для математической достоверности, с критическим влиянием на регулярность вылетов. Такой выбор позволяет отработать алгоритм на понятной стохастической системе перед его масштабированием на более сложные и дорогие компоненты ВС.

Ключевым отличием работы является отказ от идеализированных условий. Исследование проводится на «сырых» данных реальной эксплуатации ВС за продолжительный период времени. Методология включает в себя не только построение прогнозной модели, но и обоснование процедуры предобработки данных (цензурирование периодов простоя) и сравнительный анализ конкурирующих гипотез о законе распределен. Такой подход позволяет создать верифицированный инструмент для перехода от реактивного обслуживания к проактивному управлению надежностью.

Материалы и методы исследования.

Анализ набора данных.

В данной работе применялся набор данных, содержащий сведения о выявленных неисправностях и выполненных мероприятиях по ТОиР для парка из девяти однотипных коммерческих воздушных судов, эксплуатируемых на внутренних авиалиниях в период с 2014 по 2020 годы. Исходный набор данных («сырые» выгрузки из бортовых журналов и систем управления ТОиР) включает 13204 записи.

Каждая запись характеризуется следующим набором атрибутов: «Date Reported» (дата фиксации события), «A/C Reg» (регистрационный номер ВС), «Defect» (текстовое описание неисправности), «Action» (описание корректирующих действий). Классификация систем и подсистем выполнена в соответствии с международным стандартом ATA 100 (ATA iSpec 2200) [10]. Для унификации анализа атрибуты «Chapter» (система) и «Section» (подсистема) были объединены в единый категориальный признак формата CS (Chapter-Section). Всего в выборке идентифицировано 456 уникальных категорий неисправностей.

Статистический анализ распределения записей выявил существенную неоднородность. 30 наиболее частых категорий формируют около 62% от общего объема дефектов (рисунок 1). Лидирующую позицию занимает категория CS 25-21 (интерьер пассажирского салона, 1971 запись). Однако дефекты интерьера, как правило, не влияют на летную годность и устраняются в рамках отложенных дефектов, что делает их менее приоритетными для задач оперативного прогнозирования готовности ВС к вылету.

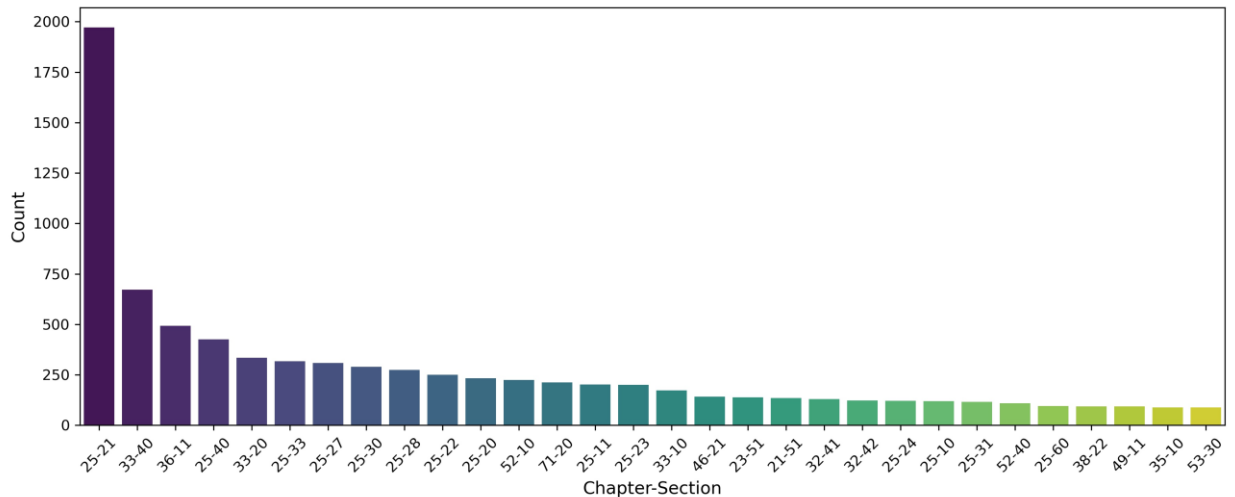


Рисунок 1 – Число записей для 30 наиболее часто встречающихся категорий дефектов

В качестве целевого объекта для моделирования и валидации методики была выделена категория CS 33-40 «LIGHTS-Exterior» (Внешнее световое оборудование) с объемом выборки $N = 671$. Выбор данной категории обоснован совокупностью факторов, критически важных для корректной верификации предсказательной модели.

1. Плотный поток отказов обеспечивает необходимую статистическую мощность для надежной оценки параметров распределения и минимизации ошибки второго рода при проверке гипотез.

2. Физика отказов светового оборудования (перегорание нити накала, деградация полупроводников) позволяет тестировать гипотезу о постоянной интенсивности отказов без влияния сложных накопительных эффектов износа, характерных для механических узлов.

3. Согласно перечням минимального исправного оборудования (MEL), неисправность элементов внешнего освещения (например, рулежных или посадочных фар в ночное время, стробоскопов) является условием «No-Go» или накладывает жесткие эксплуатационные ограничения. Таким образом, прогнозирование потребности в этих компонентах имеет прямое экономическое значение для предотвращения задержек вылета.

Пример структуры данных для выбранной категории приведен в таблице 1. Для соблюдения конфиденциальности реальные регистрационные номера ВС были заменены на условные обозначения (A, B, C и т.д.).

Важной особенностью исследуемого временного ряда является наличие выраженных периодов эксплуатационного простоя, визуализированных на тепловой карте интенсивности отказов рисунка 2. В частности, для ВС наблюдается полное отсутствие зарегистрированных инцидентов в 2018 году, а также резкое снижение частоты событий в 2019-2020 годах. Данная аномалия коррелирует с внешними факторами, а именно приостановкой полетов по операционным причинам (2018 г.) и глобальным снижением авиаперевозок в период пандемии COVID-19.

Наличие таких длительных интервалов календарного времени, в течение которых эксплуатация ВС не производилась, вносит критическое искажение в расчет показателей надежности. Если не исключить эти периоды, модель будет интерпретировать простой ВС

как безотказную работу, что приведет к занижению интенсивности отказов и ошибочному прогнозу. Это наблюдение служит обоснованием применения статистической фильтрации аномально длинных интервалов (выбросов),

Таблица 1 – Фрагмент набора данных с категорией неисправности CS 33-40

Date Reported	A/C Reg	Chapter-Section	Chapter	Section	Defect	Action
2014-01-02	B	33-40	33	40	LH SIDE LIGHT IS INOP	LH SIDE TAXI LIGHT LAMP IAW AMM 33-40-03 REPLACED, OPER TEST IS O'K. ADD IS CLEARED.
2014-01-04	A	33-40	33	40	WING ROOT LANDING LIGHT RH SIDE IS INOP.	WING ROOT LANDING LIGHT LAMP REPLACED IAW AMM 33-41-01
2014-01-08	H	33-40	33	40	RH SIDE TAXI LIGHT U/S	WING-ROOT TAXI LIGHT LAMP AHS BEEN REPLACED IAW AMM TASK 33-42-01-400-801A. TEST IS OK
2014-01-09	G	33-40	33	40	NOSE TAXI LIGHT IS INOP	NOSE TAXI LAMP HAS BEEN REPLACED ACC AMM 33-42- 03
2014-01-09	G	33-40	33	40	NOSE TAXI LIGHT IS INOP	NOSE TAXI LAMP HAS BEEN REPLACED ACC AMM 33-42- 03

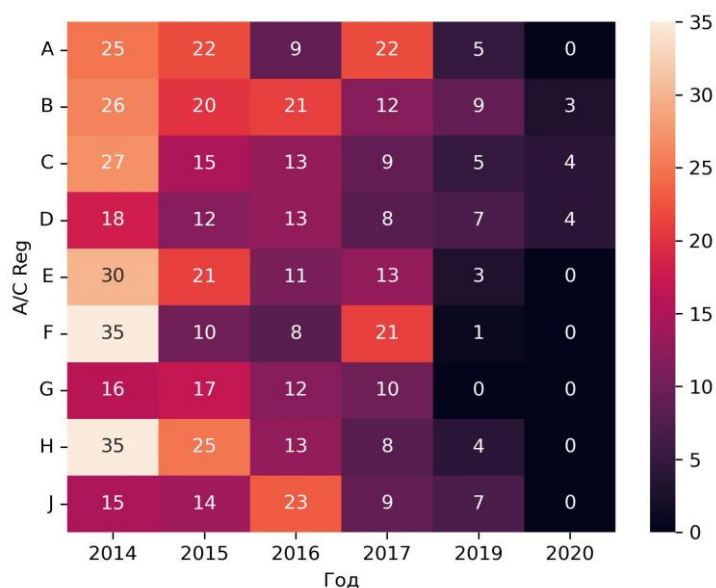


Рисунок 2 – Количество выявленных дефектов CS 33-40 по годам для каждого ВС

На рисунке 3 показаны диаграммы размаха рассчитанных временных интервалов в днях между отказами по категории CS 33-40 для каждого ВС в имеющейся базе данных.

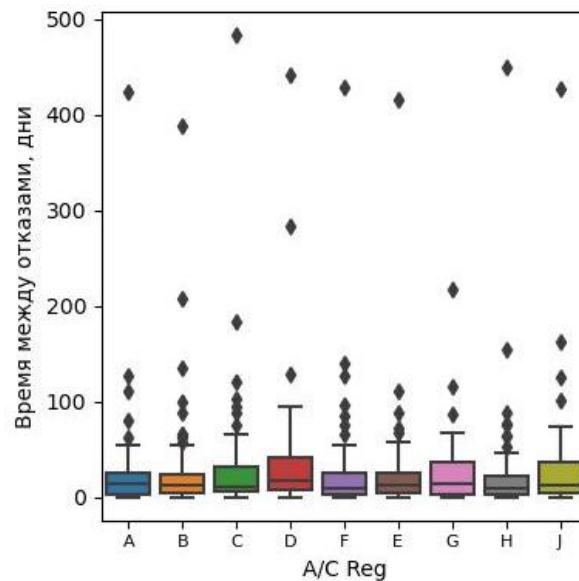


Рисунок 3 – Диаграммы размаха временных интервалов в днях между отказами по категории CS 33-40

В соответствии с этим, для достижения цели исследования была выполнена фильтрация данных по 0,95 квантилю для исключения из выборки anomalously длинных временных интервалов, которые, соответствуют периодам длительного простоя ВС. Удаление этих выбросов позволяет построить прогностическую модель, адекватно описывающую процесс отказов именно в условиях нормальной эксплуатации, и избежать искажения ключевых статистических параметров.

Выбор и обоснование функции распределения вероятности.

Первичный визуальный анализ гистограммы распределения временных интервалов, показанной на рисунке 4, демонстрирует характерную форму с правосторонней асимметрией, свойственную показательному (экспоненциальному) закону $\text{Exp}(\lambda)$ [10]. Однако для построения надежной прогностической модели визуальной оценки недостаточно. Для строгости статистического вывода была проведена проверка альтернативных гипотез.

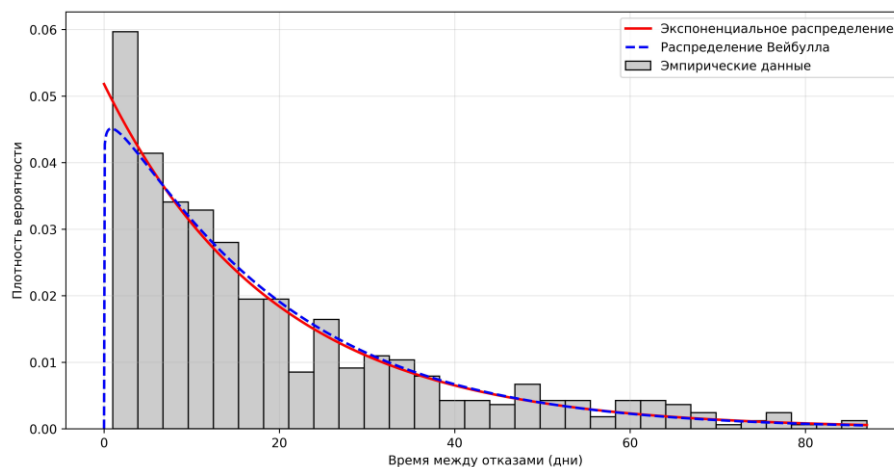


Рисунок 4 – Гистограмма распределения временных интервалов между ТОиР для CS 33-40 и наложенные кривые плотности вероятности экспоненциального распределения и распределения Вейбулла

В качестве основной конкурирующей модели было выбрано двухпараметрическое распределение Вейбулла $W(\beta, \eta)$, являющееся обобщением экспоненциального закона и

стандартом в теории надежности для описания систем с изменяющейся интенсивностью отказов (наличием эффектов приработки или старения) [10]:

$$f_x(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

где t – время до отказа, β – параметр формы, η – параметр масштаба.

Для фильтрованной выборки объемом $N = 573$ наблюдения (после исключения неэксплуатационных простоев) методом максимального правдоподобия при помощи python библиотеки `scipy 1.16.3` были оценены параметры моделей.

Для экспоненциального распределения (рисунок 4) расчетное значение интенсивность отказов

$$\lambda = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i} \quad (2)$$

принимает следующее значение $\lambda = 0,0518$.

Для распределения Вейбулла параметр формы $\beta = 1,039$, а параметр масштаба $\eta = 19,6091$.

Величина $\beta \approx 1,04$ с физической точки зрения указывает на то, что поток отказов исследуемой системы носит стационарный, чисто случайный характер, не отягощенный выраженными процессами накопления усталости ($\beta > 1$) или производственных дефектов ($\beta < 1$). Фактически, распределение Вейбулла в данном случае вырождается в экспоненциальное.

Для количественного сравнения качества моделей и исключения риска переобучения были использованы информационный критерий Акаике (AIC) и критерий согласия Колмогорова-Смирнова (D) [12]. Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительный анализ качества аппроксимации эмпирических данных

Вероятностная модель	Оцененные параметры	Критерий Акаике (AIC)	Статистика Колмогорова-Смирнова (D)	p -значение (КС-тест)
Экспоненциальное распределение $\text{Exp}(\lambda)$	$\lambda = 0,0518$	4540,39	0,0505	0,1041
Распределение Вейбулла $W(\beta, \eta)$	$\beta = 1,039$, $\eta = 19,6091$	4541,05	0,0542	0,0669

Анализ данных таблицы 2 позволяет сделать следующие выводы. Экспоненциальная модель имеет меньшее значение AIC, чем модель Вейбулла. Это означает, что введение дополнительного параметра формы не дает статистически значимого прироста в точности описания данных, а лишь увеличивает сложность модели. Согласно принципу парсимонии, предпочтение следует отдать более простой модели.

Обе модели показывают p -значение $> 0,05$, что означает, что ни одна из них не отвергается статистически. Однако экспоненциальное распределение демонстрирует более высокое p -значение (0,1041 против 0,0669) и меньшее значение D -статистики 0,0505 против 0,0542), что говорит о лучшем соответствии эмпирическим данным на всем диапазоне значений.

Результаты численного моделирования находят визуальное подтверждение при анализе квантиль-квантильного графика (QQ-plot), представленного на рисунке 5. График

отображает зависимость между квантилями эмпирической выборки и теоретическими квантилями экспоненциального распределения.

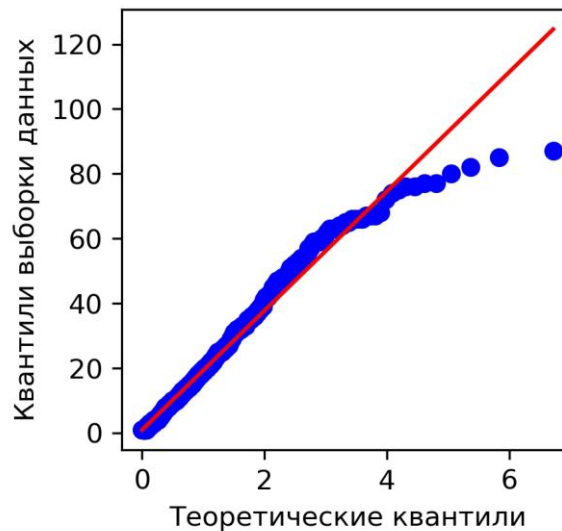


Рисунок 5 – QQ-plot: диаграмма рассеяния для сравнения квантилей эмпирических и теоретических данных

На графике наблюдается высокая степень линейной корреляции, при которой большинство точек располагается вдоль референсной прямой $y = x$. Это свидетельствует о том, что выбранная модель адекватно описывает основную массу эксплуатационных событий.

Характерное отклонение точек от прямой в области верхних квантилей, где наблюдаемые интервалы оказываются несколько короче теоретических предсказаний, является ожидаемым артефактом для реальных систем ТОиР. Периодические формы технического обслуживания (A-check, C-check) и превентивные замены компонентов ограничивают возможность возникновения экстремально длинных интервалов между записями, которые допускает теоретическое экспоненциальное распределение.

Следует отметить, что построение аналогичного QQ-plot для распределения Вейбулла не выявило визуально значимых отличий и не устранило данное отклонение в «хвосте», что еще раз подтверждает вывод о нецелесообразности усложнения модели.

Таким образом, выбор экспоненциального закона распределения в данном исследовании является не упрощением, а статистически обоснованным решением. Доказано, что для рассматриваемого типа оборудования и условий эксплуатации применение более сложных моделей является избыточным и не повышает прогностическую точность.

Разработка прогностической модели.

На основании результатов статистического анализа и сравнительной оценки качества аппроксимации (см. таблицу 2), в качестве базовой математической модели для прогнозирования отказов категории CS 33-40 принят экспоненциальный закон распределения.

Математически вероятность того, что случайное время до следующего отказа T не превысит заданный временной интервал t (т.е. вероятность возникновения потребности в техническом обслуживании в течение ближайших t дней), описывается кумулятивной функцией распределения:

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0. \quad (3)$$

Физический смысл полученного параметра λ раскрывается через его обратную величину – среднее время наработки на отказ:

$$E[T] = \frac{1}{\lambda} \approx \frac{1}{0,0518} \approx 19,3 \text{ дня.} \quad (4)$$

Важно подчеркнуть, что полученное в (4) значение характеризует надежность системы именно в периоды активной эксплуатации (благодаря процедуре предварительной фильтрации простоев), что делает его более точным ориентиром для планирования, чем простое календарное усреднение.

Графическая интерпретация разработанной прогностической модели представлена на рисунке 6 в виде кривой нарастания вероятности отказа.

Полученная модель (рисунок 6) позволяет выполнить прогноз о вероятности обслуживания ВС по типу неисправности CS 33-40 в течение определенного числа дней. Например, вероятность возникновения потребности в ТОиР в течении 10 дней составляет 40,4 %, а в течении 50 дней – 92,5 %.

Результаты и их обсуждение.

В исследовании показано, что для массовых компонентов типа «эксплуатация до отказа» на примере внешнего светового оборудования простая однопараметрическая модель экспоненциального распределения является не только допустимой, но и статистически оптимальной. Сравнительный анализ с двухпараметрическим распределением Вейбулла (по критериям АИС и тесту Колмогорова-Смирнова) показал, что усложнение математического аппарата не приводит к значимому повышению точности прогноза.

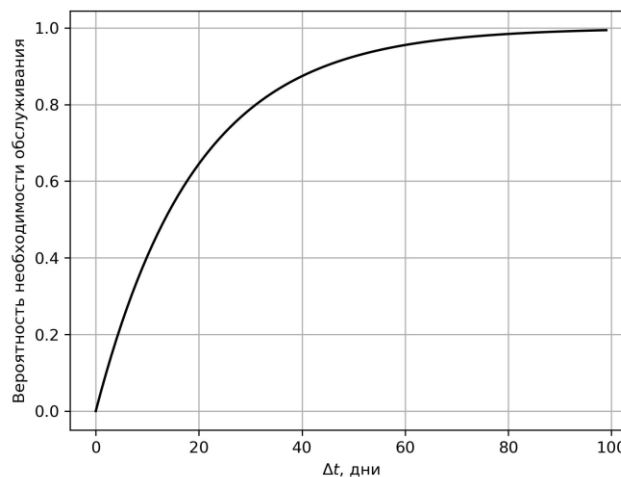


Рисунок 6 – Кривая нарастания вероятности отказа для категории CS 33-40

Ключевые преимущества предложенного подхода заключаются в следующем.

1. В отличие от моделей МО, параметры разработанной модели имеют ясный физический смысл (наработка на отказ). Это критически важно для сертификации методик ТОиР авиационными регуляторами, требующими прозрачности алгоритмов принятия решений.

2 Модель легко интегрируется в существующие информационные системы управления ТОиР и не требует значительных вычислительных мощностей или разметки больших данных, что делает ее доступной для внедрения в авиакомпании среднего размера.

3.Методика предварительной фильтрации данных (цензурирование неэксплуатационных простоев) позволяет получать устойчивые оценки надежности даже в условиях нестабильной эксплуатации.

Вместе с тем, необходимо обозначить границы применимости полученной модели. Допущение о постоянной интенсивности отказов ($\lambda = \text{const}$) справедливо для электронных и электрических компонентов, подверженных случайным сбоям, но не может быть

автоматически перенесено на механические узлы с выраженным усталостным износом (тормозные диски, шины, лопатки турбин), где требуется применение распределений Вейбулла или Гамма.

Кроме этого, модель является агрегированной для всего парка. Она усредняет влияние индивидуальных особенностей эксплуатации конкретного борта (маршрутная сеть, климатические условия базирования). Включение этих ковариат могло бы повысить точность, однако требует значительно большего объема данных, чем доступно в стандартных отчетах о дефектах.

Несмотря на ограничения, предложенный подход является универсальным. Он может быть успешно масштабирован на другие системы авионики и электрооборудования, отказы которых также носят стохастический характер. Таким образом, работа обеспечивает хорошую основу для поэтапного перехода оператора от реактивного обслуживания к предиктивному управлению надежностью парка.

Заключение.

В ходе исследования разработана и валидирована методика прогнозирования потребности в техническом обслуживании для систем с внезапным характером отказов. На основе сравнительного анализа доказано, что для выбранного объекта (внешнее световое оборудование) экспоненциальная модель является статистически оптимальной, делая применение более сложного распределения Вейбулла избыточным. Важным методологическим вкладом стало обоснование фильтрации неэксплуатационных простоев, устраняющее критические искажения оценок надежности.

Практическая значимость работы заключается в создании прозрачного, интерпретируемого инструмента для инженерных служб, позволяющего оптимизировать складские запасы и повысить регулярность полетов. Предложенный подход служит эффективной, вычислительно легкой альтернативой моделям МО для массовых стохастических систем, обеспечивая высокую точность прогноза в условиях реальной эксплуатации.

Список литературы

1. Alomar, I., Nikita, D. (2025). Managing Operational Efficiency and Reducing Aircraft Downtime by Optimization of Aircraft On-Ground (AOG) Processes for Air Operator. *Appl. Sci.* vol. 15, article no. 5129. <https://doi.org/10.3390/app15095129>.
2. Jammal, P., Pinon-Fischer, O., Mavris, D., Wagner, G. (2025). Predictive Maintenance of Aircraft Braking Systems: A Machine Learning Approach to Clustering Brake Wear Patterns. *AIAA SciTech Forum*. <https://doi.org/10.2514/6.2025-0710>.
3. Shen, Y., Khorasani, K. (2020). Hybrid multi-mode machine learning-based fault diagnosis strategies with application to aircraft gas turbine engines. *Neural Netw.*, vol. 130, pp. 126-142. 10.1016/j.neunet.2020.07.001. Epub 2020 Jul 8. PMID: 32673847.
4. Qi Liu, Zhiyao Zhang, Peng Guo, Yi Wang, Junxin Liang (2024). Enhancing aircraft engine remaining useful life prediction via multiscale deep transfer learning with limited data, *Journal of Computational Design and Engineering*, Volume 11, Issue 1, February 2024, Pages 343–355, <https://doi.org/10.1093/jcde/qwae018>.
5. Deng, S., Zhou, J. (2024). Prediction of Remaining Useful Life of Aero-engines Based on CNN-LSTM-Attention. *Int J Comput Intell Syst* 17, 232. <https://doi.org/10.1007/s44196-024-00639-w>.
6. Elsherif, S.M., Hafiz, B., Makhlof, M.A. (2025). A deep learning-based prognostic approach for predicting turbofan engine degradation and remaining useful life. *Sci Rep* 15, 26251 <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09155-z>.
7. Dangut, M.D., Jennions, I.K., King, S. (2023). A rare failure detection model for aircraft predictive maintenance using a deep hybrid learning approach. *Neural Comput & Applic* 35, 2991–3009. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07167-8>

8. Juseong Lee, Mihaela Mitici, (2023). Deep reinforcement learning for predictive aircraft maintenance using probabilistic Remaining-Useful-Life prognostics, Reliability Engineering & System Safety, Volume 230, 108908, <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108908>.
9. Yuanfu Li, Yao Chen, Zhenchao Hu, Huisheng Zhang (2023). Remaining useful life prediction of aero-engine enabled by fusing knowledge and deep learning models, Reliability Engineering & System Safety, Volume 229, 108869, <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108869>.
10. Air Transport Association of America, 2021, iSpec 2200: Information Standards for Aviation Maintenance, Harvard Dataverse <https://doi.org/10.7910/DVN/G1DSMX>.
11. Каштанов В.А., Медведев А.И. (2010). Теория надежности сложных систем. – 2-е изд., перераб. – М.: ФИЗМИАТЛИТ. С – 606. / Kashtanov V.A., Medvedev A.I. (2010). Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem. – 2-e izd, pererab. – М.: FIZMIATLIT. – 606 s.
12. Wasserman, L. (2004). All of statistics: A concise course in statistical inference. New York, NY: Springer.

СЫРТҚЫ ЖАРЫҚ ЖАБДЫҚТАРЫНЫҢ МЫСАЛЫНДА АВИАЦИЯЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРГЕ ТЕХНИКАЛЫҚ ҚЫЗМЕТ КӨРСЕТУДІҢ БОЛЖАМДЫ МОДЕЛІНІҢ СТАТИСТИКАЛЫҚ НЕГІЗДЕМЕСІ ЖӘНЕ ВАЛИДАЦИЯСЫ

Аңдатпа. Мақала нақты пайдалану деректерін статистикалық талдау негізінде авиациялық техникаға техникалық қызмет көрсетудің болжамды моделін құру әдістемесін әзірлеуге және валидациялауға арналған. Модельдік объект ретінде оқиғалардың жоғары жиілігімен және ұшулардың жүйелілігіне сыни әсерімен сипатталатын "сыртқы жарық жабдығы" (External lights) істен шығу санаты таңдалды. Зерттеу жеті жыл ішінде тоғыз әуе кемесіне техникалық қызмет көрсету және жөндеу туралы 13204 жазбалар жиынтығына негізделген. Жұмыстың әдіснамалық жаңалығы-деректерді алдын-ала өңдеу процедурасын негіздеу. Әуе кемелерінің ұзақ тұруына байланысты қалыптан тыс аралықтарды цензуралау үшін 0,95 квантиль бойынша сүзу қолданылды. Негізгі нәтиже-сәтсіздік ағынын сипаттау үшін экспоненциалды үлестіруді таңдаудың статистикалық негіздемесі. Вейбулдың екі параметрлі таралуымен салыстырмалы талдау (Акаике ақпараттық критерийі мен Колмогоров-Смирновтың сынағы негізінде) модельдің күрделенуімен дәлдіктің айтарлықтай өсуінің жоқтығын көрсетті (β формасының параметрі 1,04). Соңғы нәтиже-сәтсіздік тәуекелдерін сандық бағалауға мүмкіндік беретін құрылған ықтималдық моделі. Жұмыстың практикалық маңыздылығы инженерлік қызметтер үшін түсіндірілетін құралды құру болып табылады, ол машиналық оқыту модельдерінен айырмашылығы шешім қабылдаудың ашықтығын және қойма қорларын оңтайландыруды қамтамасыз етеді.

Түйін сөздер: болжамды техникалық қызмет көрсету, сенімділік теориясы, сәтсіздіктерді талдау, экспоненциалды үлестіру, уақыт қатарлары, болжамды модель.

STATISTICAL JUSTIFICATION AND VALIDATION OF A PREDICTIVE MAINTENANCE MODEL FOR AIRCRAFT SYSTEMS: A CASE STUDY OF EXTERNAL LIGHTING EQUIPMENT

Abstract. This paper is devoted to the development and validation of a methodology for constructing a predictive maintenance model for aircraft systems based on statistical analysis of real operational data. The failure category "External Lights" was selected as the model object, as it is characterized by a high event frequency and a critical impact on flight schedule regularity. The study is based on a dataset comprising 13,204 maintenance and repair records for nine aircraft collected over a seven-year period. The methodological novelty of the work lies in the justification of the data preprocessing procedure. A 0.95-quantile-based filtering approach was applied to censor anomalous inter-event times associated with extended aircraft downtime. The

key result is the statistical justification for selecting the exponential distribution to describe the failure process. A comparative analysis with the two-parameter Weibull distribution, using the Akaike Information Criterion and the Kolmogorov–Smirnov goodness-of-fit test, demonstrated no statistically significant improvement in accuracy when increasing model complexity (shape parameter $\beta \approx 1.04$). The final outcome is a probabilistic model that enables quantitative assessment of failure risks. The practical significance of the study lies in the development of an interpretable decision-support tool for engineering and maintenance services which, unlike machine learning models, ensures transparency in decision-making and supports optimization of spare parts inventory management.

Keywords: predictive maintenance, reliability theory, failure analysis, exponential distribution, time series, predictive model.

Сведение об авторах

Каипбек Мэлскызы	Гульсанат	Докторант, Академия Гражданской Авиации, Алматы, Казахстан E-mail: kaipbegulsanat@gmail.com
Савостин Александрович	Алексей	Кандидат технических наук, ассоциированный профессор, профессор кафедры «Энергетика и радиоэлектроника» Северо-Казахстанского университета им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан, E-mail: asavostin@ku.edu.kz
Кошекков Темирбаевич	Кайрат	Доктор технических наук, профессор, проректор по научной деятельности, Академия Гражданской Авиации, Алматы, Казахстан, E-mail: kkoshekov@mail.ru
Савостина Владимировна	Галина	PhD, доцент кафедры «Энергетика и радиоэлектроника» Северо-Казахстанского университета им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан E-mail: gvsavostina@ku.edu.kz

Авторлар туралы мәлімет

Каипбек Мэлскызы	Гульсанат	Азаматтық авиация академиясының докторанты, Алматы, Қазақстан E-mail: kaipbegulsanat@gmail.com
Савостин Александрович	Алексей	Техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Солтүстік Қазақстан университетінің "Энергетика және радиоэлектроника" кафедрасының профессоры. М. Қозыбаева, Петропавл, Қазақстан, E-mail: asavostin@ku.edu.kz
Көшекков Темирбаевич	Кайрат	Техника ғылымдарының докторы, профессор, , Азаматтық авиация академиясының ғылыми жұмыстар жөніндегі проректоры, Алматы, Қазақстан, E-mail: kkoshekov@mail.ru
Савостина Владимировна	Галина	PhD, Солтүстік Қазақстан университетінің "Энергетика және радиоэлектроника" кафедрасының доценті. М. Қозыбаева, Петропавл, Қазақстан E-mail: gvsavostina@ku.edu.kz

Information about the authors

Gulsanat Kaipbek	Doctoral researcher, Civil Aviation Academy, Almaty, Kazakhstan, E-mail: kaipbegulsanat@gmail.com
Alexey Savostin	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of "Power Engineering and Radio Electronics" of the M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan, E-mail: asavostin@ku.edu.kz
Kairat Koshekov	Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific Activities, Civil Aviation Academy, Almaty, Kazakhstan, E-mail: kkoshekov@mail.ru
Galina Savostina	PhD, Associate Professor of the Department of "Power Engineering and Radio Electronics" of the M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan E-mail: gvsavostina@ku.edu.kz

МАЗМҰНЫ/СОДЕРЖАНИЕ/ CONTENTS

<i>ӘУЕ КӨЛІГІ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР</i>	
<i>ВОЗДУШНЫЙ ТРАНСПОРТ И ТЕХНОЛОГИИ</i>	
<i>AIR TRANSPORT AND TECHNOLOGY</i>	
Hasanov A., Isgandarov I., Aliyev T. ANALYSIS AND MODELING OF ADAPTIVE FILTERS TO IMPROVE THE INTERFERENCE IMMUNITY OF SECONDARY RADAR SIGNALS	6
Кошеков К.Т., Алдамжаров К.Б., Курбанов Я.М., Курбанов В.М. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ДАННЫХ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ	20
Isgandarov I.A., Amirbayli S.Z. RADIOMETRIC-DNN HYBRID MODEL FOR AUTHENTICATING ADS-B SIGNALS	33
<i>ЛОГИСТИКА, ТАСЫМАЛДАУДЫ ҰЙЫМДАСТЫРУ, КӨЛІКТЕГІ ҚАУІПСІЗДІК</i>	
<i>ЛОГИСТИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, БЕЗОПАСНОСТЬ НА ТРАНСПОРТЕ</i>	
<i>LOGISTICS, TRANSPORTATION ORGANIZATION, TRANSPORT SECURITY</i>	
Нуржаубаев М.М., Избаирова А.С., Болатқызы С., Сарсенбаева Л.Х., Лукиных В.Ф. ТЕМІРЖОЛ СТАНЦИЯЛАРЫНДА ЖОЛДАР МЕН ВАГОНДАРДЫҢ МАРШРУТТАРЫН ТИІМДІ БӨЛУ	46
Zhanatkyzy Zh., Alimzhanova L., Akhmetova Z., Assyl-Keney S. DIGITAL FMEA-BASED RISK MITIGATION IN SUPPLY CHAINS: QUANTITATIVE ASSESSMENT AND CASE EVIDENCE	62
<i>КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР, АСПАП ЖАСАУ ЖӘНЕ АВТОМАТТАНДЫРУ</i>	
<i>КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ, ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ</i>	
<i>COMPUTER SCIENCE, INSTRUMENTATION AND AUTOMATION</i>	
Оразалиева С.Қ., Фазылова А.Р., Абдрешова С.Б., Ырыскелдиев Б.Ж. ЖЕЛДІҢ КРИТИКАЛЫҚ ЖЫЛДАМДЫҒЫ КЕЗІНДЕ ЖЕЛ ГЕНЕРАТОРЫНЫҢ РОТОРЫН АВТОМАТТЫ ТҮСІРУДІҢ ЖАЛПЫ ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ	73
Ермек Б.Қ., Чурикова М.В., Әлиқызы А., Шинбаева А.К., Омарова Ж.Б. ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ: СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ GUM И МОНТЕ-КАРЛО НА ПРИМЕРЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕРМОМЕТРА	85
Омар А.Б., Мусиралиева Ш.Ж. АГРЕССИВТІ МАЗМҰНДЫ ЖІКТЕУ МІНДЕТТЕРІ ҮШІН ФЕДЕРАТИВТІ ОҚЫТУ: ТРАНСФОРМЕР МОДЕЛЬДЕРІ НЕГІЗІНДЕГІ ӘДІС	101
Кубигенова А.Т., Ақтаева А.У., Шарипбай А.А., Сухомлин В.А., Молдашева Р.Н. ҮЛКЕН ДЕРЕКТЕР ТЕХНОЛОГИЯСЫНА ШОЛУ	113
Садвакасов Р.М., Садвакасова К.Ж. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ VR-ТЕХНОЛОГИЙ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ, МИКРОСКОПИЧЕСКИХ И ГИБРИДНЫХ ПОДХОДОВ	128
Ибраим М.С., Мырзабеков К.М., Оралбек Ж.Ж. АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА РАЗРАБОТКИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАЗМИНИРОВАНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ	140
Kadirybayeva G.K., Chezhimbayeva K.S., Khizirova M.A., Mukhamejanova A.D. STUDY OF THE EFFECTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS ON THE HUMAN BODY DURING MOBILE PHONE USE	157
Sagynbayev A.A., Kaibassova D.Z., Sagynbayeva A.A. COMPARATIVE ANALYSIS OF AI-GENERATED TEXT DETECTION MODELS IN STUDENT TEXTUAL ASSIGNMENTS	175
Рахимова Д., Жігер А.Ж., Малых В. ҚҰҚЫҚТЫҚ МӘТІНДЕРДІ ҚАЗАҚ, ОРЫС ТІЛДЕРІНЕ НЕЙРОНДЫ МАШИНАЛЫҚ АУДАРУДЫҢ ӘДІСТЕРІ МЕН САПАЛЫҚ ТАЛДАУЫ	187

Абдыкадыров А.А., Бурдин А.В., Смайлов Н.Қ., Төлен Г.Б. ВИБРОАКУСТИКАЛЫҚ МОНИТОРИНГ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ТАЛШЫҚТЫ-ОПТИКАЛЫҚ МОДАЛЬДЫҚ ҚҰРЫЛЫМДАР МЕН СПЕКТРАЛДЫ-КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ РАДИОПЕЛЕНГТЕУ ӘДІСІНІҢ ӨЗАРА ЫҚПАЛЫ МЕН ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ	200
Tugambayeva A.A., Sakhipov A.A. AUTOMATED GENERATION OF DOMAIN-SPECIFIC LEARNING ASSIGNMENTS USING GENERATIVE LANGUAGE MODELS FOR CIVIL AVIATION TRAINING	211
Abdualiyev A.E., Sembina G.K., Aigerim A., Suhrab Y. MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF REGIONAL BUDGET ALLOCATION BASED ON NSGA-II WITH FAIRNESS CONSTRAINTS	225
Каипбек Г., Савостин А., Кошекков К., Савостина Г. СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ВНЕШНЕГО СВЕТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ	241

CONTENTS

<i>AIR TRANSPORT AND TECHNOLOGY</i>	
Hasanov A., Isgandarov I., Aliyev T. ANALYSIS AND MODELING OF ADAPTIVE FILTERS TO IMPROVE THE INTERFERENCE IMMUNITY OF SECONDARY RADAR SIGNALS	6
Koshekov K., Aldamzharov K., Kurbanov Y., Kurbanov V. ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE QUALITY OF TRAINING DATA OF NEURAL NETWORKS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON FLIGHT SAFETY	20
Isgandarov I.A., Amirbayli S.Z. RADIOMETRIC–DNN HYBRID MODEL FOR AUTHENTICATING ADS-B SIGNALS	33
<i>LOGISTICS, TRANSPORTATION ORGANIZATION, TRANSPORT SECURITY</i>	
Nurzhaubayev M., Izbairova A., Bolatkyzy S., Sarsenbayeva L., Lukinykh V. OPTIMIZATION OF TRACK DISTRIBUTION OF INDUSTRIAL RAILWAY STATIONS BETWEEN CAR DESIGNATIONS	46
Zhanatkyzy Zh., Alimzhanova L., Akhmetova Z., Assyl-Keney S. DIGITAL FMEA-BASED RISK MITIGATION IN SUPPLY CHAINS: QUANTITATIVE ASSESSMENT AND CASE EVIDENCE	62
<i>COMPUTER SCIENCE, INSTRUMENTATION AND AUTOMATION</i>	
Orazalieva S., Fazylova A., Abdreshova S., Yrskeldiev B. DEVELOPMENT OF A GENERAL SYSTEM FOR AUTOMATIC LOWERING OF A WIND GENERATOR ROTOR AT CRITICAL WIND SPEED	73
Yermek B., Churikova M., Alikyzy A., Shinbayeva A., Omarova Zh. MEASUREMENT UNCERTAINTY EVALUATION: COMPARISON OF GUM AND MONTE CARLO METHODS ON THE EXAMPLE OF A BIMETALLIC THERMOMETER	85
Omar A., Mussiraliyeva Sh. A TRANSFORMER MODEL APPROACH TO FEDERATED LEARNING FOR AGGRESSIVE CONTENT CLASSIFICATION TASKS	101
Kubigenova A., Aktaeva A., Sharipbay A., Sukhomlin V., Moldasheva R. BIG DATA TECHNOLOGIES: AN OVERVIEW	113
Sadvakassov R., Sadvakassova K. MODELING THE EVACUATION PROCESS IN FIRE CONDITIONS USING VR TECHNOLOGIES: A COMPARATIVE ANALYSIS OF MACROSCOPIC, MICROSCOPIC, AND HYBRID APPROACHES	128
Ibraim M., Myrzabekov K., Zhanay Oralbek ANALYSIS OF GLOBAL EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT OF ROBOTIC SYSTEMS FOR DEMINING AND THEIR APPLICATION	140
Kadirbayeva G.K., Chezhimbayeva K.S., Khizirova M.A., Mukhamejanova A.D. STUDY OF THE EFFECTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS ON THE HUMAN BODY DURING MOBILE PHONE USE	157
Sagynbayev A.A., Kaibassova D.Z., Sagynbayeva A.A. COMPARATIVE ANALYSIS OF AI-GENERATED TEXT DETECTION MODELS IN STUDENT TEXTUAL ASSIGNMENTS	175
Rakhimova D., Zhiger A., Valentin Malykh NEURAL MACHINE TRANSLATION METHODS FOR LEGAL TEXTS INTO KAZAKH AND RUSSIAN LANGUAGES AND THEIR QUALITY ANALYSIS	187
Abdykadyrov A., Bourdine A., Smailov N., Tolen G. STUDY OF THE INTERACTION AND EFFICIENCY OF FIBER-OPTICAL MODAL STRUCTURES AND SPECTRAL-CORRELATION RADIO DIRECTION FINDING METHOD IN VIBROACOUSTIC MONITORING SYSTEMS	200

Tugambayeva A.A., Sakhipov A.A. AUTOMATED GENERATION OF DOMAIN-SPECIFIC LEARNING ASSIGNMENTS USING GENERATIVE LANGUAGE MODELS FOR CIVIL AVIATION TRAINING	211
Abdualiyev A.E., Sembina G.K., Aigerim A., Suhrab Y. MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF REGIONAL BUDGET ALLOCATION BASED ON NSGA-II WITH FAIRNESS CONSTRAINTS	225
Kaipbek G., Savostin A., Koshekov K., Savostina G. STATISTICAL JUSTIFICATION AND VALIDATION OF A PREDICTIVE MAINTENANCE MODEL FOR AIRCRAFT SYSTEMS: A CASE STUDY OF EXTERNAL LIGHTING EQUIPMENT	241

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 29.12.2025 ж. қол қойылды.

Формат 205*290. Өлшемі - баспа табақшасы. Таралымы 50 дана.

Издание подписано 29.12.2025 г.

Формат 205*290. Размер –печатная пластина. Тираж 50 экз.

The publication was signed on, December 29, 2025.

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