

Information technologies in economics and environmental sciences



No 2 / 2024

Information Technologies in Economics and Environmental Sciences

Founder:

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Year of foundation: 2017

Published 2 times a year

Editors office address:

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

03041, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, Ukraine

E-mail: it-journal@nubip.edu.ua

<https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Inf/en>

Інформаційні технології в економіці та природокористуванні

Засновник журналу:

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Факультет інформаційних технологій

Рік заснування: 2017

Виходить 2 рази на рік

Адреса редакції:

Національний університет біоресурсів і природокористування України

03041, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна

E-mail: it-journal@nubip.edu.ua

<https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Inf/uk>

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор

Глазунова Олена Григорівна | доктор педагогічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Заступник головного редактора

Кравченко Володимир Миколайович | доктор економічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Відповідальний секретар

Мирончук Катерина Вячеславівна | Національний університет біоресурсів і природокористування України

Національні члени редколегії

Болбот Ігор Михайлович | доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Голуб Белла Львівна | кандидат технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Голуб Тетяна Василівна | кандидат технічних наук, НУ «Запорізька політехніка»

Гусєв Борис Семенович | кандидат технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Іванченко Євгенія Вікторівна | кандидат технічних наук, професор, Національний авіаційний університет

Коваленко Олексій Єпіфанович | доктор технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Лобанчикова Надія Миколаївна | кандидат технічних наук, доцент, ДУ «Житомирська політехніка»

Мокрієв Максим Володимирович | кандидат економічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Нікітенко Євгеній Васильович | кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Олійник Андрій Олександрович | доктор технічних наук, професор, НУ «Запорізька політехніка»

Сагун Андрій Вікторович | кандидат технічних наук, доцент Національний університет біоресурсів і природокористування України

Сватко Віталій Володимирович | кандидат технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Семко Віктор Володимирович | доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Скрупський Степан Юрійович | кандидат технічних наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка»

Смолій Вікторія Миколаївна | доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Хиленко Володимир
Васильович**

доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Швиденко Михайло
Зіновійович**

кандидат економічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Шкарупило Вадим
Вікторович**

доктор технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Міжнародні члени редколегії

**Ахметов Бахитжан
Сражатдінович**

доктор технічних наук, професор, університет Туран (м. Алмати, Казахстан)

**Жаміль Абедалярахім
Жаміль Альсаядех**

PhD, Технічний університет Малайзії, Мелака (UTeM)

**Жерліцин Дмитро
Михайлович**

доктор економічних наук, професор, Інститут підприємництва Університету національної та світової економіки (м. Софія, Болгарія)

Мікулецький Пітер

PhD, професор, RNDr., Університет Градець-Кралове (м. Градець-Кралове, Чехія)

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

Glazunova Olena

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Deputy Editor-in-Chief

Kravchenko Volodymyr

D.Sc. (Economics), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Executive Secretary

Myronchuk Kateryna

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Editorial Board Members

Bolbot Igor

D.Sc. (Technical Sciences), Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Golub Bella

Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Gusev Borys

Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Holub Tetiana	Ph.D. (Technical Sciences), National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Ukraine
Ivanchenko Yevheniia	Ph.D. (Technical Sciences), Professor, National Aviation University, Ukraine
Kovalenko Oleksiy	D.Sc. (Technical Sciences), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Lobanchykova Nadiia	Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor, Zhytomyr Polytechnic State University, Ukraine
Mikriev Maksym	Ph.D. (Economics), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Nikitenko Yevheniy	Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Олійник Андрій	D.Sc. (Technical Sciences), Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Ukraine
Sahun Andrii	Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Svatko Vitaliy	Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Semko Viktor	D.Sc. (Technical Sciences), Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Skrupsky Stepan	Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Ukraine
Smolij Viktorija	D.Sc. (Technical Sciences), Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Khilenko Volodymyr	D.Sc. (Technical Sciences), Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Shvydenko Mykhailo	Ph.D. (Economics), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Shkarupylo Vadym	D.Sc. (Technical Sciences), Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

International Members of the Editorial Board

Akhmetov Bakhytzhn	D.Sc. (Technical Sciences), Professor, Turan University, Kazakhstan, Almaty
Jamil Abedalrahim Jamil Alsayaydeh	Ph.D., Universiti Teknikal Malaysia Melaka (UTeM)
Zherlitsyn Dmyro	D.Sc. (Economics), Professor, Institute of Entrepreneurship, University of National and World Economy, Bulgaria, Sofia
Mikulecky Peter	Ph.D., Professor, RNDr., University of Hradec Kralove, Czech Republic, Hradec Kralove

CONTENTS

Nazarenko Volodymyr

AUTONOMOUS VEHICLES ESSE: UNSUPERVISED ONLINE LEARNING WITH SEMANTIC SEGMENTATION CONCEPT 8

Качмарський Олекса Ігорович

ВИЗНАЧЕННЯ СТАДІЙ ЗРІЛОСТІ ПОЛУНИЦІ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛЕЙ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ 14

Кузьмінська Олена Геронтіївна, Мокрієв Максим Володимирович

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ОЦІНЮВАННЯ МАГІСТЕРСЬКИХ РОБІТ: ПРИКЛАД РЕАЛІЗАЦІЇ В УМОВАХ ЦИФРОВОГО ОСВІТНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ 24

Костенко Інна Сергіївна, Клименко Євгеній Олегович,
Харченко Володимир Віталійович

АНАЛІЗ ОСВІТНЬОЇ ПРОПОЗИЦІЇ ДЛЯ ВСТУПУ В ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ В 2024 РОЦІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ POWER BI 37

Weigang Ganna, Myronchuk Kateryna

MODELING THE DYNAMICS OF TRAFFIC FLOWS BASED ON QUEUEING THEORY FOR INTEGRATION INTO INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS 46

Смолій Вікторія Миколаївна, Шепелева Марина Євгеніївна,
Смолій Натан Вікторович, Шепелев Микита Сергійович

ПРОЄКТУВАННЯ ПРИЛАДУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПАТРОНУ 54

Nazarenko Volodymyr, Ostroushko Bogdan

ENHANCING HUMAN-COMPUTER INTERACTION: THE ROLE OF INTELLIGENT USER INTERFACES IN EMBEDDED AND IOT SYSTEMS 65

Сагун Андрій Вікторович, Місюра Максим Дмитрович, Білич Мілана Сергіївна

ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ ЯКОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕШ-ФУНКЦІЇ 78

Лажно Валерій Анатолійович, Касаткін Дмитро Юрійович

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СТРАТЕГІЇ АДАПТАЦІЇ В ПРОТИСТОЯННЯ КРИПТОВАЛЮТ ТА КВАНТОВИХ КОМП'ЮТЕРІВ 85

ЗМІСТ

Nazarenko Volodymyr

AUTONOMOUS VEHICLES ESSE: UNSUPERVISED ONLINE LEARNING WITH SEMANTIC SEGMENTATION CONCEPT 8

Качмарський Олекса Ігорович

ВИЗНАЧЕННЯ СТАДІЙ ЗРІЛОСТІ ПОЛУНИЦІ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛЕЙ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ 14

Кузьмінська Олена Геронтіївна, Мокрієв Максим Володимирович

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ОЦІНЮВАННЯ МАГІСТЕРСЬКИХ РОБІТ: ПРИКЛАД РЕАЛІЗАЦІЇ В УМОВАХ ЦИФРОВОГО ОСВІТНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ 24

Костенко Інна Сергіївна, Клименко Євгеній Олегович,
Харченко Володимир Віталійович

АНАЛІЗ ОСВІТНЬОЇ ПРОПОЗИЦІЇ ДЛЯ ВСТУПУ В ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ В 2024 РОЦІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ POWER BI 37

Weigang Ganna, Myronchuk Kateryna

MODELING THE DYNAMICS OF TRAFFIC FLOWS BASED ON QUEUEING THEORY FOR INTEGRATION INTO INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS 46

Смолій Вікторія Миколаївна, Шепелева Марина Євгеніївна,
Смолій Натан Вікторович, Шепелев Микита Сергійович

ПРОЄКТУВАННЯ ПРИЛАДУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПАТРОНУ 54

Nazarenko Volodymyr, Ostroushko Bogdan

ENHANCING HUMAN-COMPUTER INTERACTION: THE ROLE OF INTELLIGENT USER INTERFACES IN EMBEDDED AND IOT SYSTEMS 65

Сагун Андрій Вікторович, Місюра Максим Дмитрович, Білич Мілана Сергіївна

ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ ЯКОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕШ-ФУНКЦІЇ 78

Лахно Валерій Анатолійович, Касаткін Дмитро Юрійович

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СТРАТЕГІЇ АДАПТАЦІЇ В ПРОТИСТОЯННІ КРИПТОВАЛЮТ ТА КВАНТОВИХ КОМП'ЮТЕРІВ 85

UDC 004.2:004.4

Nazarenko Volodymyr*Ph.D., Associate Professor of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7433-2484>E-mail: volodnz@nubip.edu.ua

AUTONOMOUS VEHICLES ESSE: UNSUPERVISED ONLINE LEARNING WITH SEMANTIC SEGMENTATION CONCEPT

Abstract. *The presented study explores continuous adaptation techniques for monocular depth estimation and semantic segmentation to improve real-time scene understanding capabilities for autonomous vehicles and driver assistance systems. The proposed methodologies enable models to dynamically adjust to new information in video sequences, sustaining high performance amidst ongoing changes in scene appearance, lighting, and other contextual factors. The first contribution is continuous online adaptation for monocular depth estimation, eliminating the need for isolated fine-tuning techniques and retaining information across video frames. The method addresses data drift by perpetually adapting to new frames, preventing overfitting due to limited data diversity. Experience replay is integrated to stabilize the learning process and introduce minimal computational overhead. Techniques like auto-masking and velocity supervision help differentiate between stationary and moving objects, mitigating errors related to inconsistent depth cues. The study validates the effectiveness of the proposed approach through intra-dataset and cross-dataset adaptation scenarios, showing substantial accuracy gains while maintaining real-time runtime.*

Keywords: *online adaptation, unsupervised learning, monocular depth estimation, semantic segmentation, autonomous cars.*

Introduction. Unsupervised online adaptation plays a crucial role in advancing the real-time scene understanding capabilities required for autonomous vehicles and advanced driver assistance systems [1]. This study explores continuous adaptation techniques for both monocular depth estimation and semantic segmentation, aiming to enhance the robustness and adaptability of models when confronted with varying environmental conditions in real-world driving scenarios [2]. The proposed methodologies enable models to dynamically adjust to new information as it appears in video sequences, a feature that is essential for sustaining high performance in the face of ongoing changes in scene appearance, lighting, and other contextual factors.

There are several key research methodologies classification for unsupervised online adaptation for depth estimation and semantic segmentation in autonomous vehicles:

- mIoU: Mean Intersection over Union (used for segmentation tasks).
- Abs Rel: Absolute Relative Error (for depth estimation).
- RMSE: Root Mean Squared Error (for depth estimation).
- NLL: Negative Log-Likelihood (used in uncertainty metrics).

Analysis of research and publications. The first contribution of this work centers on continuous online adaptation for monocular depth estimation. Traditional approaches to adapting depth models often rely on isolated fine-tuning techniques, which adapt the model separately for each frame, frequently resetting it to a pretrained state [3]. These techniques tend to be computationally intensive, as they require multiple (20-50) backpropagation steps per frame, which limits their feasibility in real-time applications [4, 5].

Purpose. The purpose of this study is to conduct a generalized overview of exiting issues, scientific methods and potential solution for autonomous vehicle detection using unsupervised online learning, with emphasis on monocular depth estimation and semantic segmentation approaches.

Methods. The proposed approach performs continuous adaptation by retaining information across video frames, eliminating the need to restart from a pretrained state with each new frame. This results in a tremendous increase of runtime speed, as only a single backpropagation per frame is needed (Table 1).

Table 1 – Summary of Unsupervised Online Adaptation Approaches for Depth Estimation and Semantic Segmentation*

Methodology	Adaptation Type	Key Techniques	Datasets Used	Metrics Evaluated	Results/Performance
Baseline Network	Offline Training	Pretrained on a large annotated dataset; no online adaptation.	KITTI, Cityscapes	mIoU, Abs Rel, RMSE	Baseline accuracy for segmentation and depth: mIoU = X%, Abs Rel = Y, RMSE = Z.
Unsupervised Online Adaptation	Self-supervised	Photometric consistency loss, spatial transformation consistency, and temporal smoothing.	KITTI, Virtual KITTI	mIoU, Abs Rel, RMSE	Improved mIoU (+2-3%), Reduced Abs Rel (-0.1), Reduced RMSE (-5%).
Domain Adaptation	Cross-domain Adaptation	Style transfer (CycleGAN), domain-specific augmentations, and entropy minimization.	SYNTHTIA → Cityscapes	mIoU, Depth Accuracy	Enhanced mIoU: SYNTHTIA to Cityscapes, ~5-7% improvement.
Continual Learning	Online, Continual Learning	Incremental updates using pseudo-labeling and confidence-weighted losses.	KITTI (Online setting)	Lifelong mIoU, Avg. Depth Error	Maintains ~95% of original accuracy across new environments; <1% performance degradation in prior tasks.
Uncertainty-based Refinement	Uncertainty-aware Adaptation	Bayesian networks, uncertainty-weighted loss functions to balance depth and segmentation tasks during training and inference.	KITTI, Cityscapes	NLL, mIoU, Abs Rel	Improved robustness to edge cases: +4% mIoU in challenging lighting; -8% Abs Rel error in occluded areas.
Augmented Data Streams	Data Augmentation in Online	Synthetic data augmentation with physics-based simulation and domain randomization; combines geometric and semantic cues during online updates.	Carla Simulator, KITTI	IoU, Absolute Depth Error	Near real-time performance: IoU > 80%, Error reduction of ~10-12% over streaming frames.
Teacher-Student Framework	Multi-task Adaptation	Teacher model generates pseudo-labels, student model refines them online using semantic segmentation and depth estimation jointly.	KITTI, Cityscapes	Task-specific mIoU, Depth Accuracy	Multi-task mIoU: +3-5%; Depth estimation precision increases in dynamic scenes.

* prepared based on author work and public research data [1-7]

For the references purpose we provide list of relevant mathematical equations based on Table 1 and research data, that had been used to evaluate various models within the scope of this research:

1. Photometric Consistency Loss is used in unsupervised depth estimation to minimize the difference between the predicted and actual pixel intensities in consecutive frames ($I_t(p)$ – pixel intensity at position p in the current frame, and $I_{t+1}(\hat{p})$ – predicted pixel intensity at p in the next frame after transformation):

$$L_{photo} = \sum_p |I_t(p) - I_{t+1}(\hat{p})|. \tag{1}$$

2. Velocity Supervision incorporates the relative velocity of objects to refine depth estimation by penalizing inconsistencies ($D_t(p)$ – depth prediction for a pixel p ; v_t – estimated velocity of the object at time t ; and d – distance of the object from the camera):

$$L_{velocity} = \sum_p \left| D_t(p) - \frac{d}{v_t} \right|. \tag{2}$$

3. Confidence Regularization restricts predictions from deviating excessively from confident outputs ($P(p)$ – current prediction confidence for pixel p ; $P(\hat{p})$ – previous prediction confidence; and τ – confidence threshold to determine significant deviations):

$$L_{conf} = \sum_p (0, |P(p) - P(\hat{p})| - \tau). \quad (3)$$

4. Semantic Segmentation Loss combines depth and semantic segmentation with a shared representation, using a weighted combination of classification and structure loss (L_{class} – cross-entropy loss for semantic classes; L_{struct} – loss derived from scene geometry and depth consistency; and α, β – weights balancing the importance of the losses):

$$L_{seg} = \alpha L_{class} + \beta L_{struct}. \quad (4)$$

5. Optical Flow-based Motion Segmentation used in future enhancements to distinguish rigid and non-rigid regions ($F(p)$ - optical flow vector at pixel p . $\hat{F}(p)$ - predicted flow vector at p):

$$L_{flow} = \sum_p \|F(p) - \hat{F}(p)\|_2^2. \quad (5)$$

These equations reflect core methodologies and challenges addressed in this research and proposed future directions for the practical model evaluation in future work.

Results. Data Drift Phenomenon in Depth Estimation and Semantic Segmentation for Autonomous Vehicles refers to the gradual change in data distribution between the training dataset (source domain) and the real-world operational data (target domain), which can significantly degrade model performance. It has strong impact on depth estimation, specially – scale ambiguity, moving objects challenges and lighting and weather variations challenges. Changes in scene structure (e.g., urban to rural environments) lead to discrepancies in depth scale and geometry. Dynamic elements (e.g., vehicles, pedestrians) cause inconsistencies in depth cues, particularly in monocular setups. Real-world conditions (e.g., fog, night lighting) differ from training data, leading to unreliable depth predictions. Additionally, data drift phenomenon impacts semantic segmentation, resulting in class distribution changes, texture variations and affects scene composition. Certain objects (e.g., road signs, rare obstacles) may be underrepresented or appear in unexpected contexts. Differences in road textures, building materials, or vegetation can mislead the segmentation model. Variability in object density, occlusions, and background features impacts the segmentation's accuracy.

One of the inherent challenges in online adaptation is the phenomenon of data drift, where the data distribution shifts over time. besides there are numerous other issues arising due this phenomenon, domain shift limited frame diversity: real-time constraints: bias toward confident classes:

- Significant variance in features between training and operational environments affects generalization
- Insufficient variability in video frames hampers the model's ability to adapt to new contexts
- Online adaptation mechanisms need to work within strict time limits without sacrificing accuracy
- High-confidence predictions for frequent classes may overshadow less frequent but critical ones

The proposed method addresses this by perpetually adapting to new frames as they appear, enabling the model to stay aligned with the evolving data. However, a continuous adaptation strategy can lead to overfitting due to the limited diversity of data within localized segments of video sequences. To counteract this, experience replay is integrated as a foundational element, which allows the model to periodically revisit past data and stabilize the learning process. This not only improves the model's accuracy but also introduces minimal computational overhead, owing to the parallel processing capabilities of modern GPUs. Experience replay proves essential in preventing the model from forgetting previously acquired knowledge while simultaneously enabling it to learn from current data in real-time. The presented approach advocates use of the following methods to overcome

present challenges - auto-masking and velocity supervision which helps isolate stationary and dynamic elements to handle motion-induced errors; confidence regularization that restricts the model from drifting too far from its confident predictions, preserving semantic integrity; shared representations for depth and semantics which encourages joint learning to leverage complementary cues for improved adaptation; auxiliary optical flow networks – provides context about movement in the scene, aiding both depth estimation and segmentation in dynamic settings.

Monocular depth estimation presents additional challenges, notably scale ambiguity and disruptions caused by moving objects within scenes. To address these, the adaptation strategy incorporates techniques such as auto-masking and velocity supervision, which help the model differentiate between stationary and moving objects, thereby mitigating errors related to inconsistent depth cues. While these techniques are commonly used in offline depth estimation tasks, this study is among the first to assess their impact within the context of online adaptation. The effectiveness of the proposed approach is validated through two types of adaptation scenarios: intra-dataset adaptation, where the model is trained and tested on different splits of a single dataset with minimal domain shift, and cross-dataset adaptation, where training and testing are conducted across significantly different datasets, introducing substantial domain variation. In both cases, the model demonstrates substantial accuracy gains compared to its not adapted variant, while maintaining real-time runtime.

Building on the advancements in depth estimation, this study extends the online adaptation framework to semantic segmentation. For autonomous systems, semantic segmentation is critical for understanding the meaning of each pixel in a scene, identifying objects, road markings, and other essential elements in real-time. This adaptation approach leverages a shared representation for depth and semantics, using self-supervised cues derived from the structure of the environment to guide adaptation in the target domain. As the model learns from these cues, it faces challenges similar to those in depth estimation, such as data drift and limited frame diversity. Additionally, there must be a mechanism to prevent the model adapted using scene structure cues from producing more geometrically but less semantically plausible outputs. To this end, a confidence regularization technique is introduced, which restricts the model from deviating too far from predictions it is highly confident in. This helps to preserve the semantic integrity of the model while no explicit semantic cues are available for adaptation.

Despite the strengths of the proposed methods, some limitations remain. The reliance on self-supervised cues, particularly those derived from moving objects, introduces ambiguities in depth estimation. While excluding moving objects from the adaptation process reduces errors, it restricts the model's ability to adapt to these dynamic elements fully. Another limitation arises from the confidence regularization technique, which tends to favor well-represented classes with high prediction confidence, potentially impairing adaptation performance for smaller or less frequent classes. Addressing these limitations may require more sophisticated class balancing strategies, particularly for online adaptation scenarios. Approaches commonly used in offline training, such as those that leverage annotations from the source domain, could prove helpful in enhancing performance for less represented classes.

In addition to exploring improved class balancing, future research may benefit from integrating auxiliary optical flow networks to aid in detecting moving objects, which would allow the model to distinguish between rigid and non-rigid regions in the scene. This, however, introduces its own set of challenges, as even minor inaccuracies in flow estimation could propagate errors in depth estimation. Alternatively, leveraging stereo camera setups, where the spatial relationship between cameras is known, may reduce the adverse effects of moving objects on adaptation performance. Future work could also explore other camera configurations, such as surround view or fisheye lenses, to increase robustness in complex environments.

Finally, integrating multi-frame input networks, which use temporal context across several frames, could further enhance adaptation. While recurrent neural networks (RNNs) are a potential solution, they require careful optimization to maintain real-time performance. Similarly, networks that compute cost volumes or feature correlations might achieve higher accuracy but are also more sensitive to moving objects, necessitating a balance between complexity and real-time feasibility. The

more detailed breakdown of online adaptation in depth estimation and semantic segmentation is presented in Table 2.

*Table 2 – Detailed overview of Online Adaptation in Depth Estimation and Semantic Segmentation**

Aspect	Approach/Technique	Challenges Addressed	Limitations	Future Directions
Monocular Depth Estimation	Auto-masking, velocity supervision	Differentiates between stationary and moving objects, mitigating scale ambiguity and motion disruptions.	Struggles to adapt to dynamic elements due to exclusion of moving objects from adaptation.	Use auxiliary optical flow networks or stereo setups to handle moving objects more effectively.
Adaptation Scenarios	Intra-dataset (minimal domain shift), Cross-dataset (significant domain variation)	Demonstrates substantial accuracy gains in both scenarios while maintaining real-time runtime.	-	-
Semantic Segmentation	Shared representation for depth and semantics, self-supervised cues, confidence regularization	Guides adaptation using scene structure; prevents deviation from highly confident predictions.	Overemphasis on well-represented classes; struggles with underrepresented ones.	Develop sophisticated class balancing strategies; leverage source domain annotations to improve adaptation.
Confidence Regularization	Regularization restricts deviations from highly confident predictions	Preserves semantic integrity in absence of explicit semantic cues.	Impairs adaptation performance for less frequent or smaller classes.	Implement advanced balancing techniques or alternative mechanisms for underrepresented classes.
Dynamic Elements	Exclusion of moving objects from adaptation	Reduces depth estimation errors caused by motion.	Limits adaptation to dynamic scenes.	Integrate multi-frame networks or surround view setups for better handling of dynamic environments.
Proposed Enhancements	Multi-frame inputs, RNNs, networks using cost volumes or feature correlations	Provide temporal context and improve accuracy.	Real-time performance challenges with RNNs and sensitivity to moving objects in cost volume computation.	Optimize RNNs for real-time applications; balance complexity with feasibility in computationally constrained setups.

* prepared based on the author's work

Conclusions. In conclusion, the study's focus on online adaptation, unsupervised learning, monocular depth estimation, and semantic segmentation highlights the intricate challenges and innovative solutions in the realm of autonomous systems. By addressing data drift and overfitting through experience replay and advanced techniques like auto-masking and velocity supervision, the proposed approach demonstrates significant improvements in accuracy and real-time runtime, paving the way for enhanced adaptation strategies. While limitations regarding self-supervised cues and class balancing strategies persist, future research directions, including the integration of auxiliary optical flow networks and multi-frame input networks, offer promising avenues for further advancements in this dynamic field.

This study lays the groundwork for ongoing advancements in online adaptation for autonomous driving, setting a foundation for adaptive scene understanding models that can maintain high performance in rapidly changing environments. The insights gained here open pathways for future exploration into more adaptive and resilient vision systems, ultimately contributing to safer and more reliable autonomous driving technologies.

References

1. Kuznietsov, Y., Proesmans, M., & Van Gool, L. (2022). Towards unsupervised online domain adaptation for semantic segmentation. In Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (pp. 261-271).

2. Chen, P. Y., Liu, A. H., Liu, Y. C., & Wang, Y. C. F. (2019). Towards scene understanding: Unsupervised monocular depth estimation with semantic-aware representation. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on computer vision and pattern recognition (pp. 2624-2632). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00273>.
3. Tonioni, A., Poggi, M., Mattocchia, S., & Di Stefano, L. (2019). Unsupervised domain adaptation for depth prediction from images. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 42(10), 2396-2409. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.03943>.
4. Kundu, J. N., Uppala, P. K., Pahuja, A., & Babu, R. V. (2018). Adadepth: Unsupervised content congruent adaptation for depth estimation. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 2656-2665). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.01599>.
5. Tonioni, A., Tosi, F., Poggi, M., Mattocchia, S., & Stefano, L. D. (2019). Real-time self-adaptive deep stereo. In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (pp. 195-204). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.05424>.
6. Sagar, A., & Soundrapandiyam, R. (2021). Semantic segmentation with multi scale spatial attention for self driving cars. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 2650-2656). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.12685>.
7. Pasupa, K., Kittiworapanya, P., Hongngern, N., & Woraratpanya, K. (2022). Evaluation of deep learning algorithms for semantic segmentation of car parts. Complex & Intelligent Systems, 8(5), 3613-3625. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00397-8>.

Назаренко Володимир Анатолійович

доктор філософії, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,
Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7433-2484>

E-mail: volodnz@nubip.edu.ua

ОГЛЯД ОНЛАЙН-НАВЧАННЯ БЕЗ УЧИТЕЛЯ З СЕМАНТИЧНОЇ СЕГМЕНТАЦІЇ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Анотація. У представленому дослідженні досліджуються методи безперервної адаптації для монокулярної оцінки глибини та семантичної сегментації для покращення можливостей розуміння сцени в реальному часі для автономних транспортних засобів та систем допомоги водієві. Запропоновані методології дозволяють моделям динамічно пристосовуватися до нової інформації у відеорядах, зберігаючи високу продуктивність на тлі поточних змін зовнішнього вигляду сцени, освітлення та інших контекстуальних факторів. Першим внеском є постійна онлайн-адаптація для вимірювання глибини монокуляра, що усуває потребу в ізольованих методах тонкого налаштування та зберігає інформацію на відеокадрах. Цей метод усуває дрейф даних, постійно адаптуючись до нових кадрів, запобігаючи перевантаженню через обмежену різноманітність даних. Повторне відтворення досвіду інтегровано для стабілізації процесу навчання та введення мінімальних обчислювальних витрат. Такі методи, як автоматичне маскування та спостереження за швидкістю, допомагають розрізняти нерухомі та рухомі об'єкти, пом'якшуючи помилки, пов'язані з непостійними сигналами глибини. Дослідження підтверджує ефективність запропонованого підходу за допомогою сценаріїв адаптації всередині набору даних і між наборами даних, демонструючи значний приріст точності при збереженні часу виконання в режимі реального часу.

Ключові слова: онлайн-адаптація, навчання без учителя, оцінка глибини, семантична сегментація, автономні автомобілі.

УДК 004.8

Качмарський Олекса Ігорович

асистент кафедри комп'ютерних наук,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0241-5678>E-mail: olesprof@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ СТАДІЙ ЗРІЛОСТІ ПОЛУНИЦІ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛЕЙ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

***Анотація.** Протягом всієї історії сільського господарства технології вирощування та збору урожаю постійно вдосконалюються, полегшуючи роботу та полі та збільшуючи ефективність збору плодів. Сьогодні у галузь агропромисловості теж проникають сучасні технології, зокрема штучний інтелект. Його використання щороку стає дедалі поширенішим. Ця технологія дозволяє виробникам агропродукції в режимі реального часу отримувати великі обсяги інформації, аналізувати їх та приймати рішення щодо внесення добрив, використання пестицидів, зрошення та визначення зрілості плоду або рослини. Не менш важливим аспектом застосування рішень штучного інтелекту є відслідковування вуглецевого сліду, що дає перевагу при виході на європейські ринки збуту. Поєднання з новітніми розробками безпілотних машин та роботів дозволяє збільшити продуктивність та обсяги виробництва у сільському господарстві.*

Важливою частиною сучасної агропромисловості є комп'ютерний зір — одна з галузей штучного інтелекту, яка зосереджена на створенні інтелектуальних систем, які здатні обробляти та аналізувати візуальну інформацію так, як це робить людська сенсорна система. У рамках даної технології часто використовуються нейронні мережі, що здійснюють як розпізнавання зображень, так і їхню класифікацію.

У статті здійснено порівняльний аналіз різних моделей згорткових нейронних мереж для класифікації стадії дозрівання полуниці, а саме MobileNetV2, MobileNetV3Small та EfficientNetB0. Для оцінки нейромережі враховувалися такі параметри, як точність навчання та валідації, втрати при навчанні та валідації, час навчання. У результаті найкращі показники виявилися у мережі MobileNetV3Small. Результати та методика цього дослідження можуть бути корисними як для науковців, так і для підприємців, що працюють в агропромисловості та впроваджують штучний інтелект у виробничий процес.

***Ключові слова:** штучний інтелект, машинний/комп'ютерний зір, згорткова нейронна мережа (ЗНМ), MobileNet, EfficientNet.*

Вступ. Полуниця є однією з найпоширеніших ягідних культур у світі. Вона походить із Америки, а у Європу її привезли у 18 столітті. Комерційне виробництво полуниці почалося у 19 столітті, і у зв'язку зі щорічним збільшенням попиту зростає. Воно і не дивно, адже вона росте у будь-яких кліматичних умовах, крім полярних місцевостей, а також містить чимало вітамінів, мінералів та інших корисних та поживних елементів для організму людини. У світі вирощують близько 9 мільйонів тон цього плоду. Найбільшим виробником є Китай, який вирощує близько третини світового обсягу полуниці[1], а значну частку ринку займають також США, Туреччина та Мексика.

Завдяки автоматизації агропромислового комплексу, зростає потреба в різноманітних технологічних інноваціях, які можуть замінити традиційні функції, що виконуються людиною. Одним із ключових етапів збору полуниці є визначення ступеня зрілості ягоди. Такими системами обладнані чимало роботів, які здійснюють збірку різних овочів, фруктів, ягід та зернових культур, що дозволяє нівелювати чинник людської помилки, а також оптимізувати сам процес. Пошук оптимальної системи, яка би максимально точно та швидко визначала зрілість плодів, а тому дослідження на таку тему завжди мають потенціал для подальшого використання у промисловості.

На сьогодні існує чимало досліджень, де вивчається питання класифікації стадії зрілості плоду. Для цього використовують чимало способів: від різноманітних класифікаторів, дерев рішень до ЗНМ як з готовою архітектурою, так і з власною. Щоб оцінити ефективність тієї чи іншої технології, окрім точності потрібно також враховувати інші параметри, які дають нам розуміння щодо гнучкості та пристосованості розробленої системи до різних даних чи пристроїв.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На сьогоднішній день згорткові нейронні мережі стали одним з найпоширеніших типів нейронних мереж за рахунок вдалого розпізнавання різноманітних зображень. Їхньою відмінною рисою є наявність математичної операції згортки, і самі згорткові шари є ядром такої мережі. Ефективність цього виду нейромереж зумовлена здатністю до автоматичного виявлення потрібних ознак зображення, а також можливістю обробляти великі масиви даних при навчанні.

Машиинний зір та роль ЗНМ в ньому

Наразі існує чимало готових моделей ЗНМ, таких як VGG, AlexNet, DenseNet, ResNet, Inception, R-CNN, FAST-RCNN тощо. Для кожної з них існує одна чи кілька версій, кожна з яких відрізняється кількістю згорткових шарів(наприклад, у VGG16 16 згорткових шарів, а у VGG19 - відповідно 19). Крім цього, розробник може спроектувати власну згорткову нейромережу, або розробити кілька маленьких нейромереж різних архітектур для розв'язання певної проблеми. Також, в агропромисловості широко використовується алгоритм YOLO різних версій. Його особливість полягає в тому, що на відміну від традиційних нейронних мереж, він розпізнає об'єкти на зображенні в реальному часі, роблячи "прохід" через власну внутрішню нейронну мережу тільки один раз, тобто фактично без навчання.

Варто також і згадати про техніки, що модифікують навчальний набір даних, таких як нарощування даних(data augmentation). Цей метод передбачає збільшення навчального набору даних у кілька разів шляхом обертання зображень під різними кутами, обрізання та інших операцій з ними. Це дозволяє нейромережі бути гнучкішою для виконання поставленої задачі. Крім того, в залежності від ситуації, використовуються різні види зображень, а також кольорових моделей, серед яких: чорно-білі, кольорові(RGB RGB-D), HSV, спектральні та теплові зображення. Кожен вид зображення або кольорова модель має як свої переваги, так і недоліки, і при виборі необхідної картинки потрібно враховувати як саму задачу, так і чимало навколишніх чинників, таких як положення об'єкту в просторі, пору дня, видимість, погодні умови тощо.

Використання ЗНМ в агропромисловості

Науковці із Куньмінського університету науки і технологій здійснили дослідження [2], в ході якого був проведений порівняльний аналіз різних версій алгоритму YOLO у задачі визначення ступеню зрілості полуниці. В ході роботи було використано 1187 зображень ягід полуниці, 949 з яких було використано для навчання нейромережі, і по 119 для валідації та тестування. Навчання відбувалося на 300 епохах. В результаті алгоритм YOLOv8 відпрацював найкраще із точністю розпізнавання в 97.4%.

Часто пошук оптимальної архітектури потребує експериментальної перевірки і вимірювання ефективності та точності різних моделей. Автори такого дослідження розв'язали задачу визначення зрілості чорних та білих ягід шовковиці за їхнім зовнішнім виглядом, а також запропонували модель сортувального пристрою, який би використовував їхню розробку[3]. В ході цього, вони здійснили порівняльний аналіз 5 існуючих різновидів архітектур згорткових нейронних мереж, а саме: AlexNet, DenseNet, ResNet-18, ResNet-50, InceptionV3. Навчання відбувалося на 2000 зображеннях(по 1000 для чорних і білих ягід), 70% з яких були призначені для тренування нейромереж, а решта - для валідації та тестування. Класифікація ягід відбувалася за 4 станами: недозріла, напівнезріла, стигла, перестигла. При виборі найкращої моделі, окрім її точності, враховувався також час розпізнавання, який залежить від кількості шарів у нейромережі, а у 5 вищезгаданих архітектурах ця кількість досить різна.

Попри те, що всі нейромережі показали високу точність, але для білої шовковиці з урахуванням всіх параметрів найкращою виявилася AlexNet з точністю в 98.32% і швидкістю класифікації в 1 хв. Для чорної шовковиці найефективніше себе показала ResNet-18 з точністю в 98.65% та швидкістю класифікації в 1.2 хв. ResNet-18 виявилася найліпшою також і для змішаного набору ягід, уникнувши перенавчання та показавши точність в 98.03% і швидкість розпізнавання в 2.36 хв.

Дослідники із університету Аль-Азхар із Гази розробили нейронну мережу, яка виявляє ступінь зрілості плоду папайї на основі його зовнішнього вигляду [4]. Для цього була вибрана згортоква нейронна мережа з архітектурою VGG16. Набір навчальних даних складався з близько 300 зображень, кожне з яких містило позначення відповідного ступеня зрілості. Класифікація папайї здійснювалася на основі таких ступенів: незріла, напівзріла, зріла. За результатами цієї роботи точність нейронної мережі склала практично 100%, при навчанні нейронної мережі в 1 хв 52 секунди.

Для уникнення перенавчання та підвищення точності нейромережі використовують таку техніку, як регуляризації. У даному дослідженні [5] був проведений порівняльний аналіз різних методів регуляризації для нейронної мережі, що здійснювала виявлення ступеню зрілості манго, томату та яблука. Архітектура нейромережі VGG16 додатково містить багатошаровий перцептрон, який обробляв уже регуляризовані дані. Для збільшення навчального набору було застосоване нарощування даних (data augmentation). Для оцінки нейромережі розглядалися такі показники, як влучність, повнота та f-міра.

Без застосування регуляризації ці параметри склали (80%, 76%, 78%). При застосуванні методу регуляризації виключення (dropout) ці параметри склали (90%, 90%, 90%), для методу пакетної (batch) нормалізації (84%, 84%, 84%), а регуляризації ядра (kernel regularization) – (87%, 78%, 81%). Попри те, що метод виключення виявився найточнішим для цієї нейромережі, кожен спосіб регуляризації покращував влучність, повноту та f-міру.

Метою статті є дослідження ефективності існуючих моделей ЗНМ для класифікації стадії зрілості плоду на прикладі ягід полуниці, здійснення порівняльного аналізу отриманих результатів, визначення найефективнішої нейромережі, а також порівняння із аналогічними системами на предмет точності та швидкості розпізнавання.

Новизна цієї роботи полягає в порівнянні ефективності різних архітектур нейронних мереж на унікальному наборі зображень полуниць, спеціально зібраному для класифікації стадій дозрівання, що має практичне значення агропромислових досліджень у нашій країні. Дослідження також аналізує ефективність легких моделей на зображеннях середньої якості, що важливо для впровадження комп'ютерного зору в умовах обмежених обчислювальних ресурсів, використання моделі на мобільних або вбудованих пристроях для реального агропромислового застосування.

Матеріали і методи дослідження. Програмний код для навчання нейромереж написаний мовою Python з використанням бібліотек ComputerVision та TensorFlow. При навчанні програмно зображення приводяться до розміру 224x224 а також застосовується техніка нарощування даних. Технічні характеристики машини, на якій здійснювалося навчання нейромереж: 32 ГБ ОЗП, RX570 4GB, Intel Xeon E5 - 2670V3 12/24.

Набір даних складений самостійно, в деяких випадках зображення піддалися обробці, кольорова гама – RGB, роздільна здатність – низька. Зображення ягід розподілені за 3 класами: незрілі, наполовину зрілі та повністю зрілі (рис. 1).



Рисунок 1 – Стадії дозрівання полуниці(зліва направо): незріла, наполовину зріла, стигла

Навчальний набір містить 402 зображення, валідаційний – 91 зображення. Валідаційний набір дозволяє оцінювати продуктивність моделі на даних, які вона не застосовувала під час тренування. Навчання нейромереж здійснювалося на 100 епохах.

В контексті досліджуваних метрик розглядається матриця невідповідностей (табл. 1) – таблиця особливого компонування, що дає можливість унаочнювати продуктивність алгоритму класифікації.

Таблиця 1 – Матриця невідповідностей

	Прогнозовано: ТАК	Прогнозовано: НІ
Насправді: ТАК	TP	TN
Насправді: НІ	FP	FN

Розрізняють 4 можливі результати класифікації об’єкту:

- істинно позитивний(true positive, TP): правильно передбачена приналежність до певного класу;
- істинно негативний(true negative, TN): правильно передбачено те, що об’єкт дослідження не належить до певного класу;
- хибно-позитивний(false positive, FP): неправильно передбачена приналежність до певного класу;
- хибно-негативний(false negative, FN): неправильно передбачено те, що об’єкт дослідження не належить до певного класу.

Для оцінки нейромережі вимірювалися такі показники:

- точність(accuracy) – частка правильно прогнозованих результатів
- втрати – є мірою того, наскільки добре або погано нейромережа виконує свої завдання на даних навчального або валідаційного набору. Чим менші втрати, тим модель точніша у своїх передбаченнях.
- влучність(precision) – частка істинно-позитивних передбачень серед усіх позитивних передбачень. Обчислюється за формулою $TP / (TP + FP)$.
- повнота(recall) – частка правильних позитивних передбачень серед усіх істинних позитивів. Обчислюється за формулою $TP / (TP + FN)$.
- міра f1(f1-score) – гармонійне середнє між влучністю та повнотою, яке дозволяє отримати збалансовану оцінку. Обчислюється за формулою:

$$f1 - score = \frac{2 * Precision * Recall}{Precision + Recall}$$

- час навчання – міра того, наскільки оптимально нейромережа буде здійснювати поставлену задачу. Також, він залежить від складності і об’єму моделі, тобто чим більше шарів вона має, тим час навчання буде більший.

Для кожного параметру у кожній нейромережі побудовані відповідні гафіки, а також матриці невідповідностей.

Результати дослідження. Легкі моделі часто показують кращі результати на невеликих наборах даних низької чи середньої якості завдяки меншій кількості параметрів і схильності до меншого перенавчання. Вони ефективніше узагальнюють інформацію, коли даних недостатньо для навчання великих моделей, таких як ResNet чи VGG. Крім того, простіші архітектури краще справляються із шумом і недоліками даних низької якості, тоді як складні моделі можуть «запам’ятовувати» шум, що знижує точність [6].

В ході дослідження було здійснено порівняльний аналіз 3 існуючих різновидів архітектур ЗНМ, а саме MobileNetV2, MobileNetV3Small та EfficientNetB0, які є одними з найлегших моделей згорткових нейронних мереж у наш час.

MobileNet — це сімейство легких згорткових нейронних мереж, оптимізованих для роботи в умовах обмежених ресурсів [6]. Ключовою ідеєю, яка лежить в основі архітектури, є використання згортки з розділенням за глибиною (*Depthwise Separable Convolution*), що дозволяє значно зменшити обчислювальні витрати без значної втрати точності [6]. Це відбувається таким чином: у класичних згортках вхідний тензор розміром $h_i \times w_i \times d_i$ і застосовує згорткове ядро розміром k щоб створити вихідний тензор розміром $h_j \times w_j \times d_j$. Це призводить до обчислювальних витрат, пропорційних формулі: $h_i \times w_i \times d_i \times d_j \times k \times k$. MobileNet замінює це підходом, який розділяє згортку на два окремі етапи:

1) Глибокі згортки (*Depthwise*): кожен фільтр застосовується до одного каналу, а не до всіх.

2) Точкові згортки (*Pointwise*): використовуються згортки для лінійного об'єднання каналів.

Це дає обчислювальні витрати, визначені як: $h_i \times w_i \times d_i \times (d_j + k^2)$, що робить такі згортки ефективнішими.

MobileNetV2, наступна версія сімейства, включає нову концепцію інвертованих залишкових блоків (*Inverted Residuals*), які спрощують передавання градієнтів через мережу, та лінійні вузькі місця (*Linear Bottlenecks*), що покращують якість представлення ознак [7].

У MobileNetV3 архітектура вдосконалена за допомогою автоматичного пошуку архітектур (*Neural Architecture Search, NAS*) і впровадження механізму *Squeeze-and-Excitation (SE)*, який динамічно коригує вагу каналів для покращення точності [8]. Крім того, використання функції активації *Hard-Swish* у MobileNetV3 забезпечує покращення продуктивності без збільшення обчислювальних витрат.

EfficientNet — це сімейство моделей згорткових нейронних мереж, які оптимізовані для досягнення високої продуктивності при мінімальних обчислювальних витратах [9]. Їх головною відмінністю є використання підходу *Compound Scaling* [9]. Цей метод дозволяє одночасно збільшувати глибину, ширину та роздільну здатність вхідних зображень таким чином, щоб зберігати оптимальну архітектуру мережі:

- глибина – кількість шарів мережі, що відповідають за здатність моделі розпізнавати складніші патерни;
- ширина – кількість фільтрів у кожному шарі, що збільшує здатність мережі до паралельної обробки даних;
- роздільна здатність – розмір вхідних зображень, що впливає на деталізацію, яку мережа може навчитися розпізнавати.

Основою сімейства EfficientNet є модель EfficientNetB0 — базова модель у сімействі, яка слугує відправною точкою для масштабування. Вона була автоматично створена за допомогою Neural Architecture Search (NAS) [10]. Модель оптимізована для компромісу між точністю та обчислювальною складністю. Її архітектура включає такі ключові елементи:

- 1) MBConv блоки, які містять згортки з розділенням за глибиною, а також точкові [7], що зменшує обчислювальні витрати.
- 2) Squeeze-and-Excitation. Кожен MBConv блок містить механізм SE, що дозволяє адаптивно зважувати канали [11], підвищуючи важливість найбільш інформативних із них.
- 3) Функція активації Swish замість ReLU, яка покращує передавання градієнтів та сприяє точності моделі [12].
- 4) Початкові гіперпараметри:
 - Глибина: модель має оптимальну кількість шарів, виявлену за допомогою NAS.
 - Ширина: фільтри були обрані так, щоб забезпечити баланс між продуктивністю та ефективністю.

- Роздільна здатність: вхідні зображення мають розмір 224x224 пікселів.
- 5) Оптимізація через Compound Scaling. EfficientNetB0 є базою, яку можна масштабувати для створення інших моделей у сімействі (B1-B7), що забезпечують більшу точність при більшій обчислювальній потужності.

Результати роботи нейромереж

Нейромережа MobileNetV2 показала такі показники при навчанні: точність, влучність, повнота та F1-міра склали 99.46%, втрати 0.0139. При валідації точність, влучність, повнота та F1-міра склали 97.8%, втрати 0.099. Саме навчання нейромережі тривало 14 хв 36 с.

Як видно з графіка на рис. 2, точність навчання стабілізувалися в районі 55 епохи, при цьому точність валідації була висока з перших епох та коливалася в мажах 2-4%.

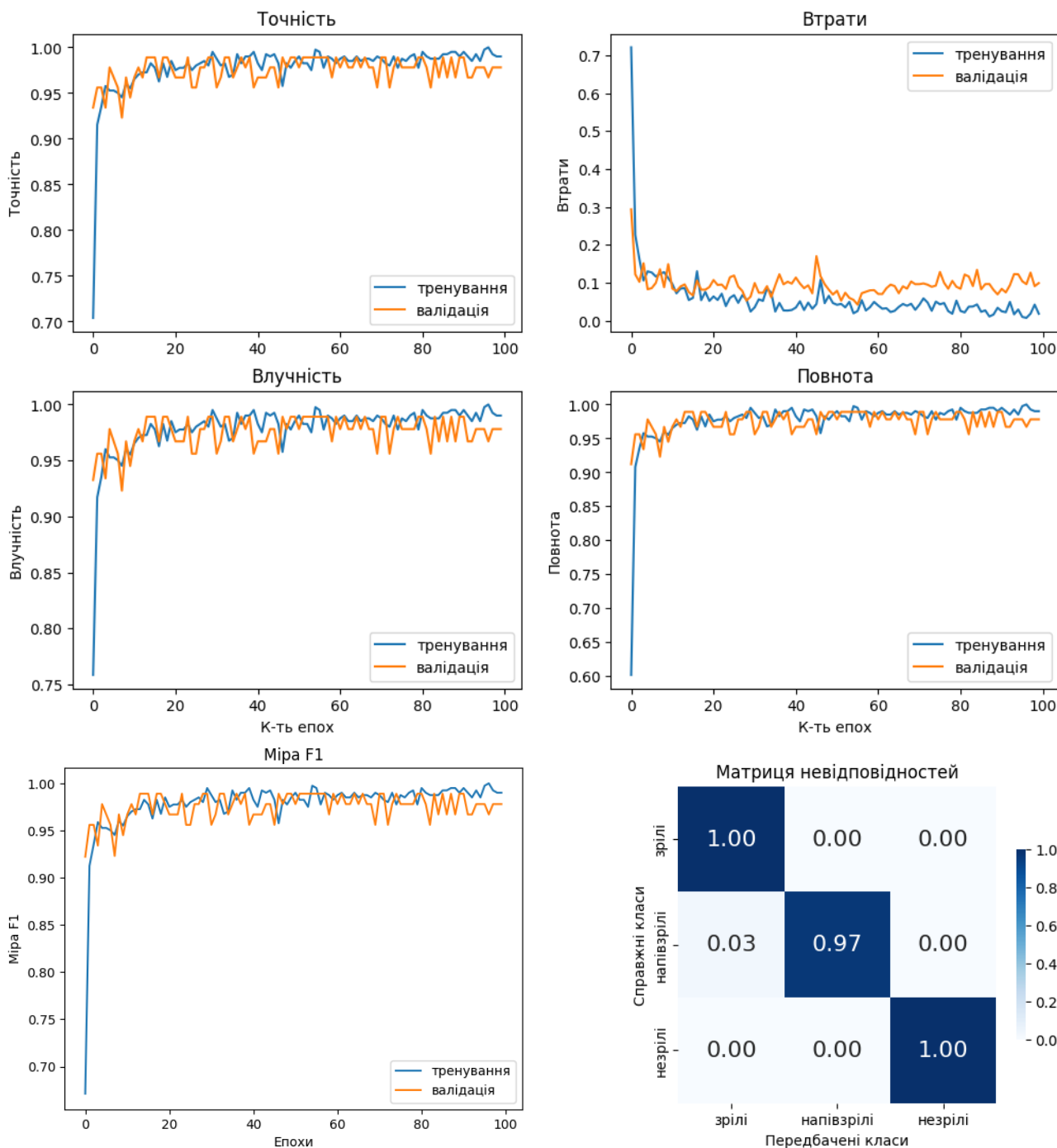


Рисунок 2 – Результати роботи моделі MobileNetV2

Неймережа MobileNetV3Small показала такі показники при навчанні: точність, влучність, повнота та F1-міра склали 98.42%, втрати 0.0288. При валідації точність, влучність, повнота та F1-міра склали 98.9%, втрати 0.0451. Саме навчання неймережі тривало 12 хв.

Як видно з графіків на рис. 3, показники при навчанні стабілізувалися в районі 50 епохи. Показники при валідації стабілізувалися приблизно на 20 епосі із незначними коливаннями в подальшому в межах 1-3%.

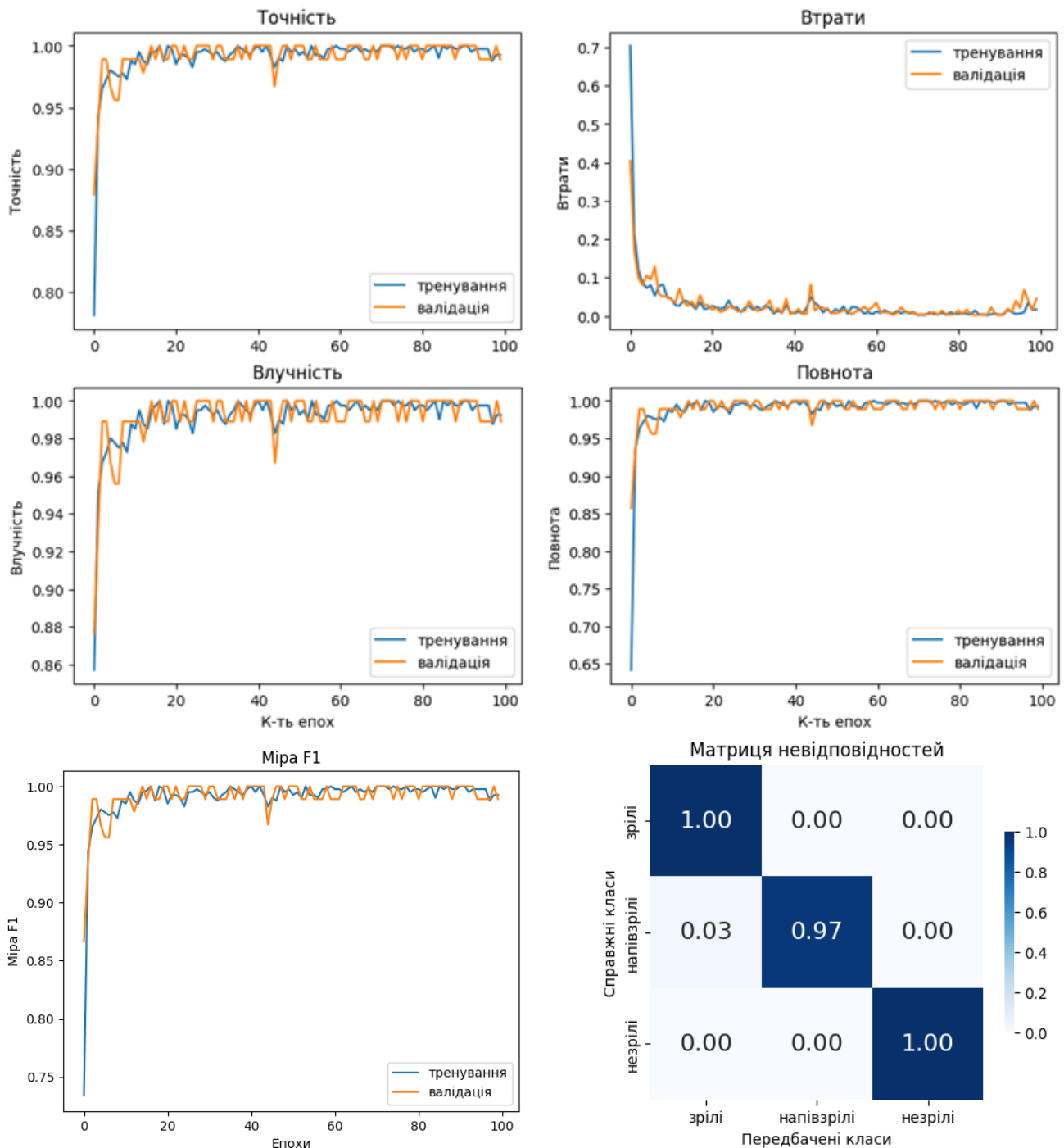


Рисунок 3 – Результати роботи моделі MobileNetV3Small

Неймережа EfficientNetB0 показала такі показники при навчанні: точність 99.33%, втрати 0.033, влучність 99.39%, повнота 99.39%, F1-міра 99.39%. При валідації точність складала 98.61%, втрати 0.04, влучність 98.61%, повнота 98.61%, F1-міра 98.61%. Саме навчання неймережі тривало 16 хв 17 с.

Як видно з графіків на рис. 4, показники при навчанні та валідації стабілізувалися в районі 15 епохи із подальшим коливанням у межах 1-2%.

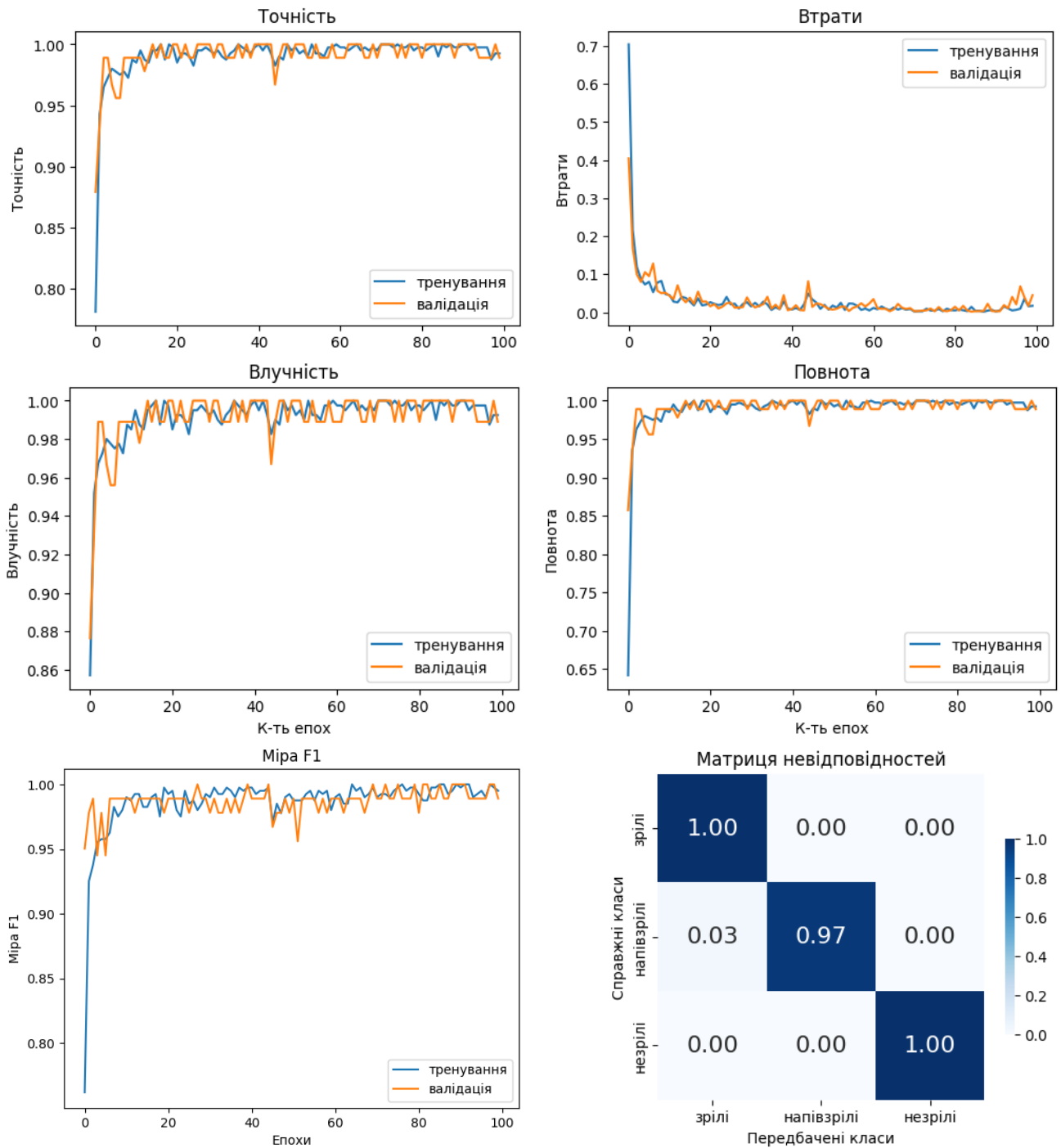


Рисунок 4 – Результати роботи моделі EfficientNetB0

Висновки. В ході цього дослідження проведений порівняльний аналіз трьох архітектур нейронних мереж для визначення зрілості полуниці. При урахуванні всіх параметрів найефективнішою виявилася нейромережа MobileNetV3Small. Її точність, влучність, повнота та F1-міра при навчанні склали 98.42%, втрати 0.0288. При валідації точність, влучність, повнота та F1-міра склали 98.9%, втрати 0.0451. Навчання нейромережі тривало 12 хв.

Отримана модель має досить високу точність класифікації стадії зрілості полуниці і за своїми параметрами є однією із найоптимальніших при порівнянні із наведеними у статті

дослідженнями. При задіяних обчислювальних спроможностях, нейромережа також показала хороший час навчання за рахунок компактної архітектури та невеликої кількості шарів.

Враховуючи постійне впровадження сучасних технологій у сільське господарство, а також бурхливий розвиток штучного інтелекту, результати цього дослідження можуть стати корисними як для вітчизняних авторів, так і для певних підприємств агропромислового комплексу.

Список використаних джерел

1. Sady i Ogrody. (2024). Co czeka rynek truskawek? Produkcja do przetwórstwa staje się nieopłacalna [What awaits the strawberry market? Production for processing is becoming unprofitable]. https://www.sadyogrody.pl/owoce/101/co_czeka_rynek_truskawek_produkcja_do_przetworstwa_staje_sie_nieoplacalna,39056.html.
2. Wang, C., Wang, H., Han, Q., Zhang, Z., Kong, D., & Zou, X. (2024). Strawberry detection and ripeness classification using YOLOv8+ model and image processing method. *Agriculture*, 14(5), 751. <https://doi.org/10.3390/>.
3. Miraei Ashtiani, S.-H., Javanmardi, S., Jahanbanifard, M., Martynenko, A., & Verbeek, F. J. (2021). Detection of mulberry ripeness stages using deep learning models. *IEEE Access*, 9, 100380–100394. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3096550>.
4. Al-Masawabe, M. M., Samhan, L. F., Al-Farra, A. H., Aslem, Y. E., & Abu-Naser, S. S. (2021). Papaya maturity classifications using deep convolutional neural networks. *International Journal of Academic Engineering Research*, 5(12), 22–29. <http://ijeais.org/wp-content/uploads/2021/12/IJEAIS211207.pdf>.
5. Pardede, J., Sitohang, B., Akbar, S., & Khodra, M. L. (2021). Implementation of transfer learning using VGG16 on fruit ripeness detection. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 13(2), 34–43. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2021.02.04>.
6. Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M., & Adam, H. (2017). MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.04861>.
7. Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L.-C. (2018). MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 4510–4520). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474>.
8. Howard, A., Sandler, M., Chu, G., Chen, L.-C., Chen, B., Tan, M., Wang, W., Zhu, Y., Pang, R., Vasudevan, V., Le, Q. V., & Adam, H. (2019). Searching for MobileNetV3. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (pp. 1314–1324). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.02244>.
9. Tan, M., & Le, Q. V. (2019). EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning* (pp. 6105–6114). PMLR <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.11946>.
10. Zoph, B., & Le, Q. V. (2017). Neural architecture search with reinforcement learning. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.01578>.
11. Hu, J., Shen, L., & Sun, G. (2018). Squeeze-and-excitation networks. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 7132–7141). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.01507>.
12. Ramachandran, P., Zoph, B., & Le, Q. V. (2017). Searching for activation functions. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.05941>.

Kachmarskyi Oleksa

*Assistant at the Department of Computer Science,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0241-5678>

E-mail: olesprof@gmail.com

DETERMINING THE STAGES OF STRAWBERRY MATURITY USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK MODELS

Abstract. Throughout the history of agriculture, crop cultivation and harvesting technologies have been constantly improving, easing the work in the field and increasing the efficiency of fruit harvesting. Today, modern technologies, including artificial intelligence, are also penetrating the agro-industrial sector. Its use is becoming increasingly widespread every year. This technology allows agricultural producers to obtain large amounts of data in real-time, analyze them, and make decisions regarding fertilizer application, pesticide use, irrigation, and determining the ripeness of fruits or plants. An equally important aspect of artificial intelligence solutions is the tracking of carbon footprints, which gives an advantage when entering European markets. The combination of the latest developments in unmanned vehicles and robots allows for an increase in productivity and production volumes in agriculture. An important part of modern agro-industry is computer vision — one of the fields of artificial intelligence, focused on creating intelligent systems capable of processing and analyzing visual information in a way similar to the human sensory system. Neural networks are often used in this technology for both image recognition and classification. This article presents a comparative analysis of various convolutional neural network models for classifying the ripeness stage of strawberries, namely MobileNetV2, MobileNetV3Small, and EfficientNetB0. The network was evaluated based on parameters such as training and validation accuracy, training and validation losses, and training time. The best results were found with the MobileNetV3Small network. The results and methodology of this research can be useful for both scientists and entrepreneurs working in the agro-industrial sector and implementing artificial intelligence in the production process.

Keywords: artificial intelligence, machine/computer vision, convolutional neural network (CNN), MobileNet, EfficientNet.

УДК 378:004

Кузьмінська Олена Геронтіївна*доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри інформаційних систем,
Національний університет біоресурсів і природокористування України*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8849-9648>E-mail: o.kuzminska@nubip.edu.ua**Мокрієв Максим Володимирович***кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем,
Національний університет біоресурсів і природокористування України*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6717-3884>E-mail: m.mokriev@nubip.edu.ua**ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ОЦІНЮВАННЯ МАГІСТЕРСЬКИХ РОБІТ: ПРИКЛАД РЕАЛІЗАЦІЇ В УМОВАХ ЦИФРОВОГО ОСВІТНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

***Анотація.** Цифровізація освіти охоплює все більше основних бізнес-процесів сучасного закладу вищої освіти. Приклад цифровізації окремих процесів підготовки та представлення результатів магістерського дослідження репрезентовано у даному дослідженні. Нами змодельовано інформаційну систему підтримки оцінювання магістерських робіт за результатами експертного оцінювання та автоматизованої перевірки тексту на наявність плагіату відповідно до нормативних документів закладу вищої освіти та загальних рекомендацій щодо дотримання академічної доброчесності. Визначено основні бізнес-процеси, а саме: управління користувачами, управління оцінюванням магістерської роботи, поширення результатів досліджень магістрів; здійснено їх декомпозицію за стандартами структурно-функціонального аналізу і проектування та рольовий розподіл потенційних користувачів системи. Запропоновано варіант реалізації цієї системи засобами LMS Moodle: визначено ресурси для завантаження тексту магістерської роботи та супровідних документів, здійснення рецензування, організації консультування магістрантів та комунікації суб'єктів освітнього процесу відповідно до визначеного рольового розподілу. Для перевірки текстів на наявність текстових збігів до LMS Moodle інтегровано відповідний модуль компанії Unicheck. Технологію Learning Tools Interoperability (LTI), що підтримується LMS Moodle, застосовано для інтеграції електронних освітніх ресурсів з навчально-інформаційного порталу університету до репозитарію магістерських робіт. Зазначено, що наявність інформаційно-освітнього середовища закладу вищої освіти та створення єдиної бази користувачів дозволить як організаційно, так і технологічно реалізувати проєктовану інформаційну систему з мінімальними затратами.*

***Ключові слова:** інформаційна система, магістерська робота, оцінювання, програмне забезпечення перевірки на плагіат, LMS Moodle.*

Вступ. Широке впровадження цифрових технологій є однією з умов виходу вищої освіти на рівень міжнародних стандартів. З іншого боку посилення позицій університетів сьогодні неможливе в умовах закритих систем освіти та окремих інституцій. За показниками рейтингу Webometrics [1] посилюється увага до наукової діяльності університетів та поширення її результатів відповідно до положень відкритої науки та комунікації [2]. Одним з інструментів наукової комунікації, що активно використовують сучасні університети для поширення результатів наукової діяльності як науково-педагогічних працівників [3], так і молодих науковців (магістри) [4], є інституційні репозитарії.

Розміщення у репозитаріях Master's Thesis (наприклад, <https://repository.usfca.edu/thes/>, <http://academysps.edu.ua/biblioteka/repozitarij-magisterskih-robit/>) забезпечує відкритість результатів досліджень магістрів для зовнішнього середовища і відповідає рекомендаціям Асоціації Європейських університетів щодо відкритого доступу до наукової інформації [5]. При цьому слід наголосити на посиленій увазі дотримання магістрантами положень академічної доброчесності [6], оскільки розвиток сучасних технологій значно розширює можливості не лише для проведення досліджень, але й плагіату, фабрикації, фальсифікації та інших порушень академічної етики. Відповідно, розміщенню магістерських робіт у

репозитаріях передус оцінка якості виконання роботи та дотримання академічної доброчесності її автором. При цьому слід зазначити, що питання академічної доброчесності студентів актуалізується в умовах COVID19, оскільки результати досліджень, зокрема, американських [7] та іспанських [8] науковців, є підставою для підвищеної уваги до підтримки академічної доброчесності суб'єктів освітнього процесу в умовах дистанційного навчання – студенти виявляють більшу академічну недоброчесність при онлайн навчанні.

Аналіз актуальних досліджень. У різних країнах та університетах розроблені різні політики та процедури дотримання академічної доброчесності й запобігання плагіату [9], [10]. У більшості закордонних університетів рівень академічної доброчесності, зокрема плагіат, є предметом моніторингу упродовж навчання студентів, а засоби академічного покарання варіюються від анулювання результатів окремої роботи до відрахування студентів з університету [11]. Запропонований у [12] підхід до розробки інституційних служб виявлення плагіату може бути використаний для перевірки текстів магістерських робіт та захисту авторських прав, оскільки в епоху цифрових технологій саме такі служби стали обов'язковим компонентом системи управління навчанням (LMS).

Що стосується забезпечення якості підготовки магістерського дослідження, підтримка та оцінка магістерської роботи є важливими завданнями університетів, а також предметом досліджень науковців і викладачів-практиків.

У роботі [13] представлено досвід використання ІКТ для підвищення якості магістерської роботи. Зокрема, визначено переваги використання ІКТ для реалізації основних процесів:

- керівництво: вибір наукових керівників, призначення рецензентів, складання розкладу презентації магістерської роботи та інших організаційних заходів, перевірка плагіату, звітність та оцінка магістерської роботи;
- супервізія: планування та проведення зустрічей (консультацій), обмін інформацією, отримання зворотного зв'язку;
- співпраця: самооцінювання роботи, взаємодія з керівником, іншими магістрами, рецензентом, адміністрацією університету тощо.

Окремі аспекти співпраці студентів із керівниками дипломних проєктів представлені у [14]. Враховуючи важливу роль зворотного зв'язку в проєктах магістерської дисертації, ставлення студентів з Нідерландів до зворотного зв'язку наукового керівника в контексті магістерської роботи можна використати для покращення взаємодії між магістрами та їх науковими керівниками. Цікавим є досвід University of Leeds (Англія) щодо оцінювання якості магістерських дисертацій [15]. Іншим прикладом є використання ІКТ для підтримки взаємодії студентів на різних етапах підготовки магістерської роботи для забезпечення якості рукописів дисертації, контролю та оцінювання, а також посилення мотивації та відповідальності магістрів [16]. У рамках цього дослідження були розроблені пропозиції як з педагогічного, так і з технічного аспектів. На нашу думку, одержані результати можна масштабувати в інших закладах вищої освіти.

При цьому слід зазначити, що проєктування інформаційної системи підтримки оцінювання магістерських робіт (рецензування та перевірка на наявність текстових збігів) розглядається як комплексний проєкт, що містить три основні компоненти: управлінський, технологічний та освітній. Його реалізація в конкретному ЗВО залежить від наявних ресурсів і компетентності учасників освітнього процесу. Відповідно до цього визначаються функціональні можливості та обмеження системи, а також перспективи її розвитку.

Мета даного дослідження: спроектувати інформаційну систему підтримки оцінювання магістерських робіт, що дозволить здійснювати системне оцінювання дипломної роботи магістрів відповідно до нормативних документів закладу вищої освіти та загальних рекомендацій щодо дотримання академічної доброчесності.

Результати дослідження. За результатами аналізу вимог та потреб потенційних користувачів, призначенням інформаційної системи підтримки оцінювання магістерських робіт є:

- організація цифрового середовища для підтримки підготовки та оцінювання дипломних проєктів магістрів;
- надання доступу до системи з облікових записів університетського освітнього середовища як для магістрантів, так і для управлінського й науково-педагогічного персоналу;
- організація розподілу ролей, необхідних в процесі наукової роботи магістрантів і до моменту захисту, та легке адміністрування цих ролей;
- організація освітньої компоненти в науковій діяльності магістрантів (до якої повинно входити питання організації наукового дослідження, дотримання академічної доброчесності та інше);
- організація оповіщення учасників процесу від керівництва (навчальної частини, відділу магістратури, деканатів, випускових кафедр тощо);
- організація спілкування магістрантів зі своїми науковими керівниками;
- організація автоматичної перевірки підготовлених робіт на плагіат;
- організація здійснення рецензування написаних робіт;
- організація розміщення допущених до захисту робіт в загальний репозитарій.

На рівні функціональної декомпозиції проєктованої системи підтримки оцінювання магістерських робіт як методу бізнес-аналізу, що використовується для полегшення розуміння і управління складними процесами, а також застосовується при розробці програмного забезпечення, нами визначено такі основні бізнес-процеси:

- управління користувачами, реалізація якого передбачає: реєстрацію користувачів, розподіл прав; створення організаційної структури даних системи та надання доступу до окремих елементів системи користувачів відповідно до ролі розподілу; додавання супровідних документів, що унормовують підготовку магістерського дослідження (положення, методичні рекомендації тощо); організацію додаткового навчання (дисципліни за вибором студента, записи вебінарів тощо); організацію комунікації усіх учасників;
- управління оцінюванням дослідження магістра, в межах якого здійснюється: завантаження дипломної роботи та категоризація за структурним підрозділом, освітньою програмою, роком випуску тощо; додавання супровідних документів (регламентується положенням про підготовку і представлення магістерської роботи у конкретному ЗВО), зокрема, відгуку керівника; здійснення нормоконтролю та завантаження результатів перевірки; призначення рецензентів з наступним їх інформуванням щодо термінів проведення експертизи конкретної дипломної роботи; моніторинг процесу оцінювання дипломної роботи; можливість оновлення файлу (магістерської роботи), наприклад, відповідно до рекомендацій, сформованих за результатами перевірки нормоконтролю чи визначення текстових збігів; реалізація управління оцінюванням декомпозується до двох основних процесів: (I) перевірка роботи на плагіат, що передбачає підключення визначеного сервісу та здійснення автоматичної перевірки кожної магістерської роботи на наявність текстових збігів у базі даних магістерських робіт конкретного ЗВО та зовнішніх Інтернет-джерел; формування звіту за результатами перевірки на плагіат; проведення (у разі потреби) додаткового експертного оцінювання – чітінгу, та формування експертного заключення щодо дотримання академічної доброчесності автора дослідження; формування рекомендацій щодо внесення змін та повторну перевірку; (II) рецензування роботи (потребує визначення рецензентів, підготовки рецензенту шаблону рецензії; здійснення рецензування (у відкритому або анонімному режимі) та завантаження рецензії);
- поширення результатів досліджень магістрів, якому передує перегляд результатів оцінювання магістерської роботи та визначення статусу роботи (допуск до захисту, рекомендація до публічного перегляду роботи чи обмежений доступ, наприклад, лише для членів екзаменаційної комісії); збереження (архівування) дипломних робіт

(оновлення бази даних ЗВО); підготовку даних для розміщення у репозитарії магістерських робіт.

Відповідно до методології структурного аналізу й проектування SADT для моделювання основних процесів оцінювання магістерських робіт обрано методологію IDEF0 (рис. 1). Саме IDEF0 та подібні методи моделювання часто використовуються для реінжинірингу процесів для уточнення реалізації певного процесу та пропонування змін у ньому [17].

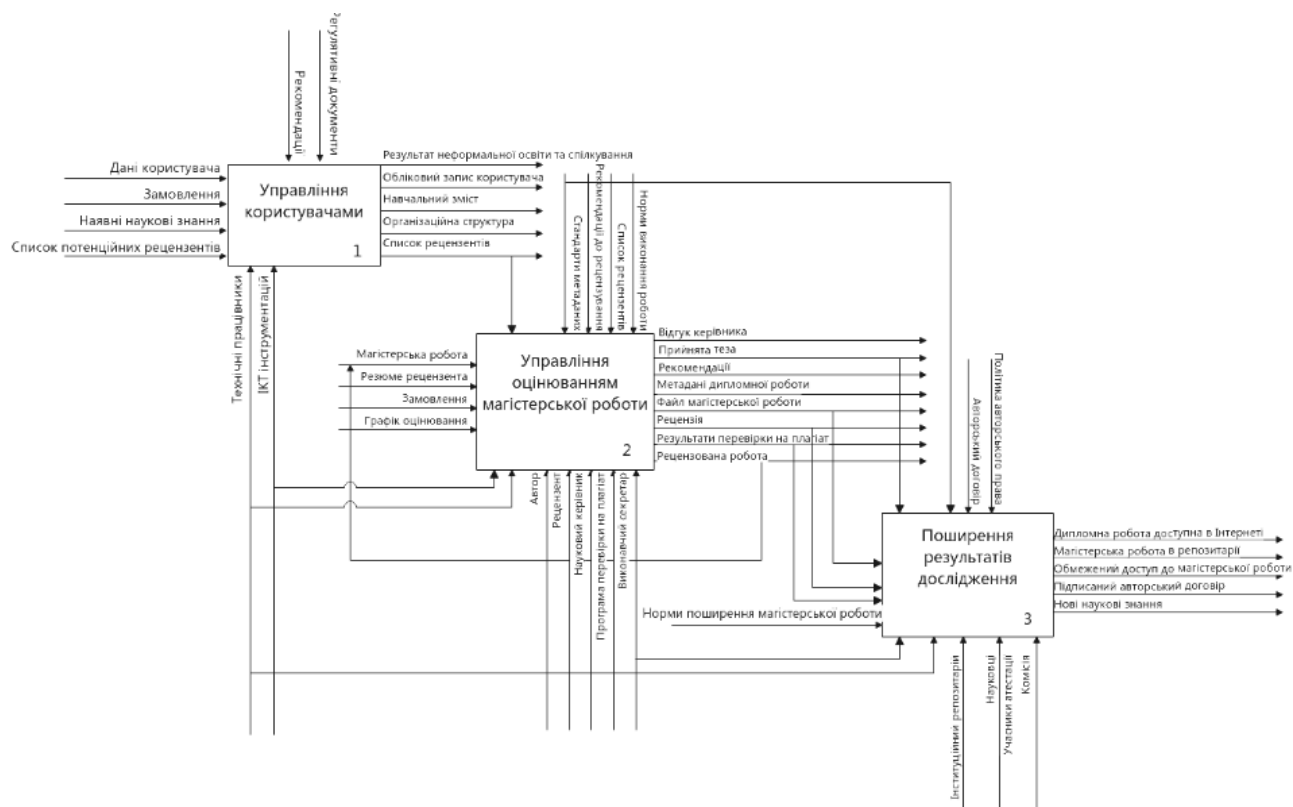


Рисунок 1 – Модель SADT інформаційної системи підтримки оцінювання магістерських робіт

Модель включає діяльність усіх учасників, залучених до процесу оцінювання магістерської роботи, а саме:

- магістрантів, які виконують дослідження, завантажують роботи у систему, одержують сповіщення та рекомендації щодо результатів перевірки нормоконтролю та наявності текстових збігів; комунікують із іншими учасниками процесу оцінювання магістерської роботи, зокрема, з науковим керівником;
- наукових керівників, які завантажують у систему відгук, «рекомендують» рецензентів, відстежують статус дипломної роботи (відповідно до етапів перевірки нормоконтролю, плагіату, рецензій), консультують магістрантів, комунікують з іншим учасниками;
- рецензентів, які за пропонуваними шаблонами готують рецензії та завантажують їх у систему;
- відповідальних секретарів, які консультують магістрантів, зокрема, розміщують у систему необхідні нормативні документи та методичні рекомендації; здійснюють нормоконтроль (відповідно до правил оформлення магістерської роботи), у разі виявлення текстових збігів здійснюють додатковий читинг та пишуть експертне заключення; призначають рецензентів, допомагають в архівуванні та наданні доступу до публікацій;

- представників деканатів, які розміщують у систему відповідні накази, графіки проведення процесу оцінювання магістерських робіт, інші інструктивні матеріали; формують склад атестаційної комісії тощо;
- членів атестаційної комісії, які можуть переглядати всі супровідні документи магістерського дослідження, а також рецензії та результати перевірки на наявність текстових збігів;
- відповідальних за ІКТ підтримку (адміністратори системи), які створюють організаційну структуру та базу даних системи, реєструють користувачів та надають права відповідно до рольового розподілу; сприяють розміщенню робіт у репозитарій, їх ідентифікації та надання вільного доступу до перегляду.

Основними концепціями методу IDEF0 є діяльність (реалізація основних бізнес-процесів) та потік. Часто для позначення потоків використовується термін ICOM (входи, елементи управління, виходи, механізми). Прикладами вхідних даних у пропонованій моделі є текстовий файл Магістерської дипломної роботи, списки потенційних рецензентів, графіки проведення оцінювання тощо. Виходи можна використовувати повторно як вхідні дані для подальшої діяльності, і можливі цикли зворотного зв'язку. Наприклад, рецензенти, що були визначені у процесі реалізації Управління оцінюванням дослідження, належать до входів у реалізації процесу Рецензування магістерських робіт, а звіт про результати перевірки роботи на наявність текстових збігів може слугувати підставою до повернення тексту дипломної роботи на доопрацювання. Проведення діяльності керується контролем. Виходи, що приймають форму інформації, також можуть використовуватися як елементи управління. Наприклад, розроблені форми оцінювання можуть бути використані як елементи управління для процесу рецензування робіт. Разом з тим, слід зауважити, що до елементів управління належать й нормативні документи, положення методології проведення досліджень та академічної етики, ліцензії та авторські договори щодо публікації результатів дослідження у відкритому доступі тощо. Механізмами, які вказують на діяльність знизу, є люди, організації, програмне забезпечення тощо, які здійснюють діяльність. При цьому слід зазначити, що на рис. 1 подано діаграму нульового рівня, проте, представлення діаграм IDEF0 є ієрархічним: окремі дії, що містяться на діаграмах, в подальшому розбиваються на підзаходи на діаграмах нижче в ієрархії. Таким чином здійснюється структурно-функціональна декомпозиція.

На нашу думку, для швидкого та фінансово необтяжливого розгортання проектованої системи оцінювання магістерських робіт при доборі відповідного програмного забезпечення слід орієнтуватись на використання програмних продуктів та організаційної структури, яка вже склалася в інформаційно-освітньому середовищі ЗВО [18]. З таким підходом можна досягти швидкого розгортання (за рахунок наявного та відомого розробникам програмного забезпечення), швидкого освоєння (за рахунок відомого та освоєного користувачами інтерфейсного середовища) та відсутності потреби повторного введення даних, які вже і так циркулюють в наявному середовищі (наприклад, облікові записи студентів та викладачів).

Для прикладу, в НУБіП України реалізоване інформаційно-освітнє середовище, яке включає єдину базу користувачів (реалізовано на базі Google Workspace for Education), навчально-інформаційний портал (реалізовано на базі LMS Moodle). Саме тому у якості базового інструментарію пропонується використати рушій для електронних навчальних курсів Moodle (<https://moodle.org>). Дана система є доступним програмним забезпеченням з відкритим кодом, що дає можливість вільно його модифікувати під власні потреби, та безкоштовним використанням, що є актуальним для державних закладів освіти України. Великий базовий та не менш потужний набір сторонніх функціональних модулів дають широкий простір для побудови потрібного середовища з мінімальною потребою доопрацювання. В НУБіП України (як і в багатьох інших університетах України) Moodle вже є робочим інструментом для навчання. Крім того, за даними міжнародного опитування 2023 року, ця система займає друге місце серед навчальних платформ [19].

Відповідно до визначеного функціоналу розглянемо приклад технічної реалізації інформаційної системи підтримки оцінювання магістерських робіт на прикладі НУБіП

України. У якості базової одиниці каталогізації робіт пропонується використовувати спеціальність, для якої використовувати таку одиницю системи Moodle, як курс (course). Спеціальності-курси об'єднують в каталоги-факультети, де також можна розміщувати загальну інформацію для всіх студентів всіх спеціальностей цього факультету у вигляді прикріплених файлів. А в середині курсів створювати завдання на кожен рік. (див. рис.2) На кожному рівні досить легко налаштувати відповідні права доступу для всіх діючих осіб в системі.

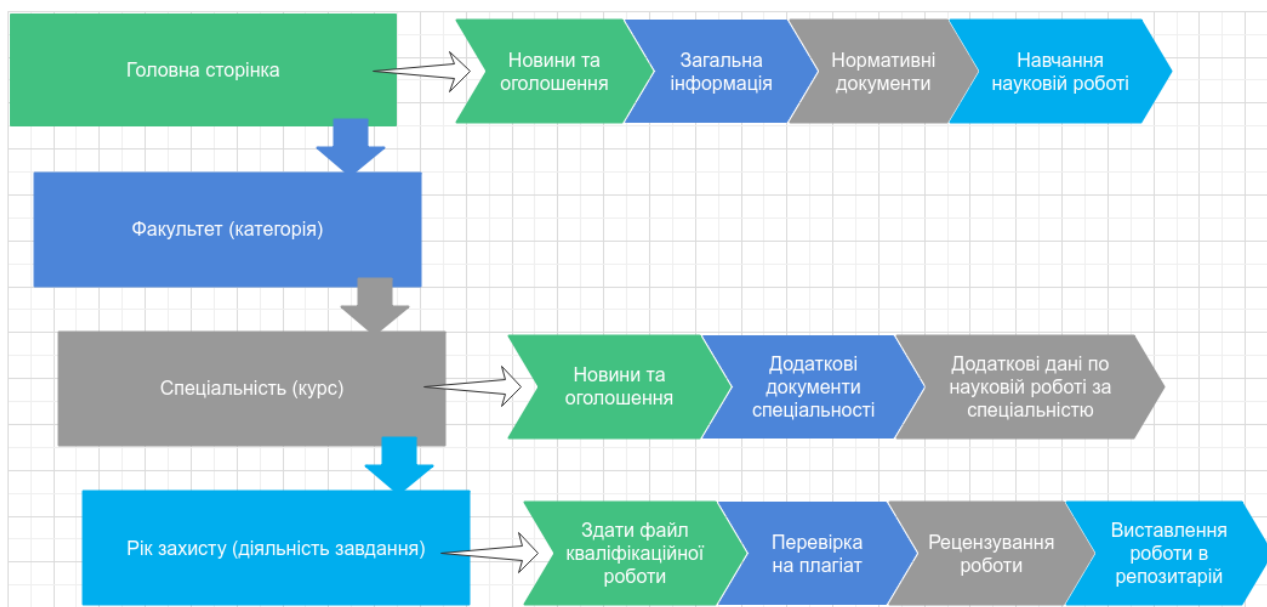


Рисунок 2 – Організаційна схема елементів системи

В базову функціональність системи Moodle входить розміщення текстів в різноманітному представленні. Це і текст на одну сторінку, і багатосторінкові тексти у вигляді модуля Книга, і розміщення файлів з даними різного формату. Тож, представлення інформації, необхідної студентам для роботи над своїм проектом не є проблемою. Різні фільтри із автозв'язування ресурсів дозволяють лише при згадці в тексті раніше опублікованого матеріалу автоматично робити на нього гіперпосилання, що суттєво спрощує і розміщення і роботу зі всіма ресурсами системи.

Базову інформацію, яка стосується всіх студентів університету, доречно розміщувати на рівні головної сторінки системи. Оскільки головна сторінка сайту в Moodle це теж курс, то на ній можна застосовувати всі ті ж технічні можливості, що і в звичайному курсі. Це і положення про підготовку та захист кваліфікаційної магістерської роботи, і положення про дотримання академічної доброчесності, і інші регламентуючі доповнення. Також, тут можемо говорити про необхідні стандарти важливі при написанні кваліфікаційної роботи. Наприклад, ДСТУ 3008-95 Державний стандарт України "Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення" та ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 "Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання". А різноманітні документи та методичні рекомендації, які стосуються написання роботи в конкретній спеціальності розміщувати власне в курсі цієї спеціальності. Прикладом такого курсу може слугувати елективний курс "Наукові комунікації у дослідженнях магістрів" (<https://elearn.nubip.edu.ua/course/view.php?id=4090>), чи МООС з питань дотримання академічної доброчесності, академічного письма тощо.

Для розміщення робіт студентами та перевірки їх на наявність текстових збігів (плагіат) пропонується використовувати модуль Завдання, який є наявним в базовій поставці Moodle. Використання цього модуля дає можливість кожному студенту завантажити свою

магістерську роботу з використанням виставлених термінів, в потрібному форматі, з визнанням дотримання академічної доброчесності (рис. 3). Проте, щоб останній не став голослівним, необхідно долучити до системи додатковий модуль перевірки на плагіат.

Підтвердження надсилання

Дана робота є моєю особистою працею, крім випадків, коли я визнав використання творів інших людей.

Відправити вашу роботу на перевірку? Після цього ви не зможете робити в ній ніяких змін.

Продовжити

Скасувати

Обов'язкові поля в цій формі позначено .

Рисунок 3 – Заява студента про відсутність плагіату в його роботі

В базовій поставці системи Moodle відсутні готові модулі перевірки на плагіат. Проте, можливість їх долучення від сторонніх розробників є. В офіційному репозитарії від Moodle представлено 19 модулів для перевірки на плагіат (<https://moodle.org/plugins/?q=type:plagiarism>). Ці модулі для Moodle є безкоштовними та з відкритим кодом. Проте, їх використання вже регламентується політикою підписки на перевірку плагіату від компаній, на програмному забезпеченні який власне і буде проводитися перевірка.

У своєму дослідженні ми послуговувалися можливістю здійснювати перевірки від української компанії Unicheck (<https://unicheck.com/>) завдяки використанню модуля інтеграції перевірки текстів на наявність текстових збігів з системою Moodle. Цей модуль можна встановити з офіційного репозитарію додаткових модулів (https://moodle.org/plugins/plagiarism_unicheck).

Перевірку на плагіат за допомогою модуля від Unicheck можна здійснювати на текстах та файлах завантажених в діяльність Завдання, на Форуми, у Воркшопи, а також тип питання Есе в тестах. Для реалізації завантаження студентами своїх робіт найкраще підійде діяльність Завдання. Використовуючи діяльність Завдання є можливість налаштувати чіткі терміни для завантаження робіт (є можливість налаштування персональних термінів); вказати кількість файлів для завантаження, якщо кваліфікаційна робота передбачає додаткові файли (наприклад, специфічні схеми, діаграми або, наприклад, завантаження додатків окремим файлом); чітко визначити формати очікуваних файлів, щоб в некоректному форматі система зовсім не приймала.

Для підключення онлайн перевірки зданих робіт на плагіат університету необхідно підключити корпоративний обліковий запис на сайті unicheck.com. Саме такий тип облікового запису дає таку можливість. Персональний обліковий запис на сайті unicheck.com не дозволяє проводити інтеграцію з іншими програмними продуктами.

Під час налаштування інтеграції з власним сервером Moodle необхідно вказати адреси серверів, для яких буде проводитися інтеграція та отримати Client key and Client secret (рис. 4), які, в свою чергу, потрібно вказати в налаштуваннях модуля виявлення плагіату в Moodle.

При цьому слід зазначити, що адміністратор середовища має багато пунктів для тонкого налаштування поведінки модуля перевірки на плагіат. Є можливість зв'язати лише з текстами в інтернеті або формувати в Unicheck базу робіт свого університету і перевіряти і в інтернеті і в своїй базі. Також можна відразу вказати, які елементи не вважаються плагіатом, або який відсоток збігу вважати плагіатом та звітувати про це (рис. 5).

Перевірка на плагіат від Unicheck надає можливість швидко здійснити перевірку завантаженого в Moodle файлу, зв'язуючи його з текстами в інтернеті та з попередніми роботами магістрів університету. Результат перевірки відразу показується студенту біля його роботи (рис. 6). А відповідальний секретар комісії із захисту може отримати доступ до розширеної інформації про результати перевірки на сторінках сайту Unicheck (рис. 7).

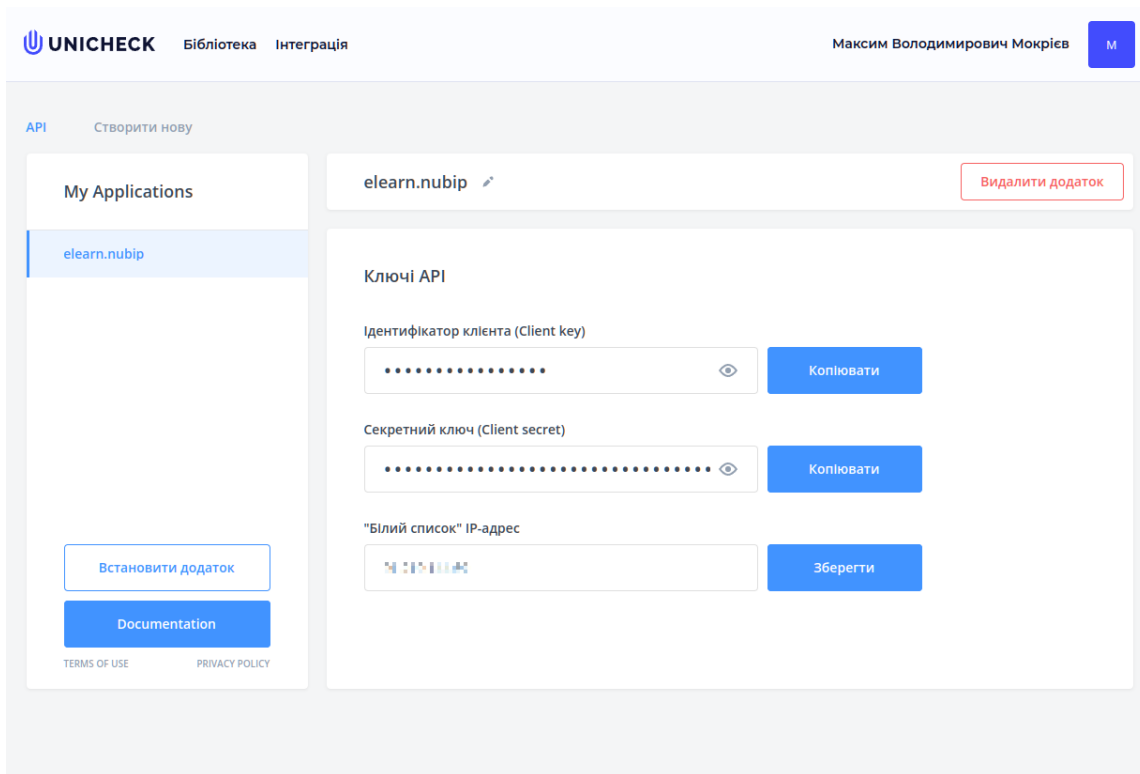


Рисунок 4 – Налаштування інтеграції Unicheck з Moodle

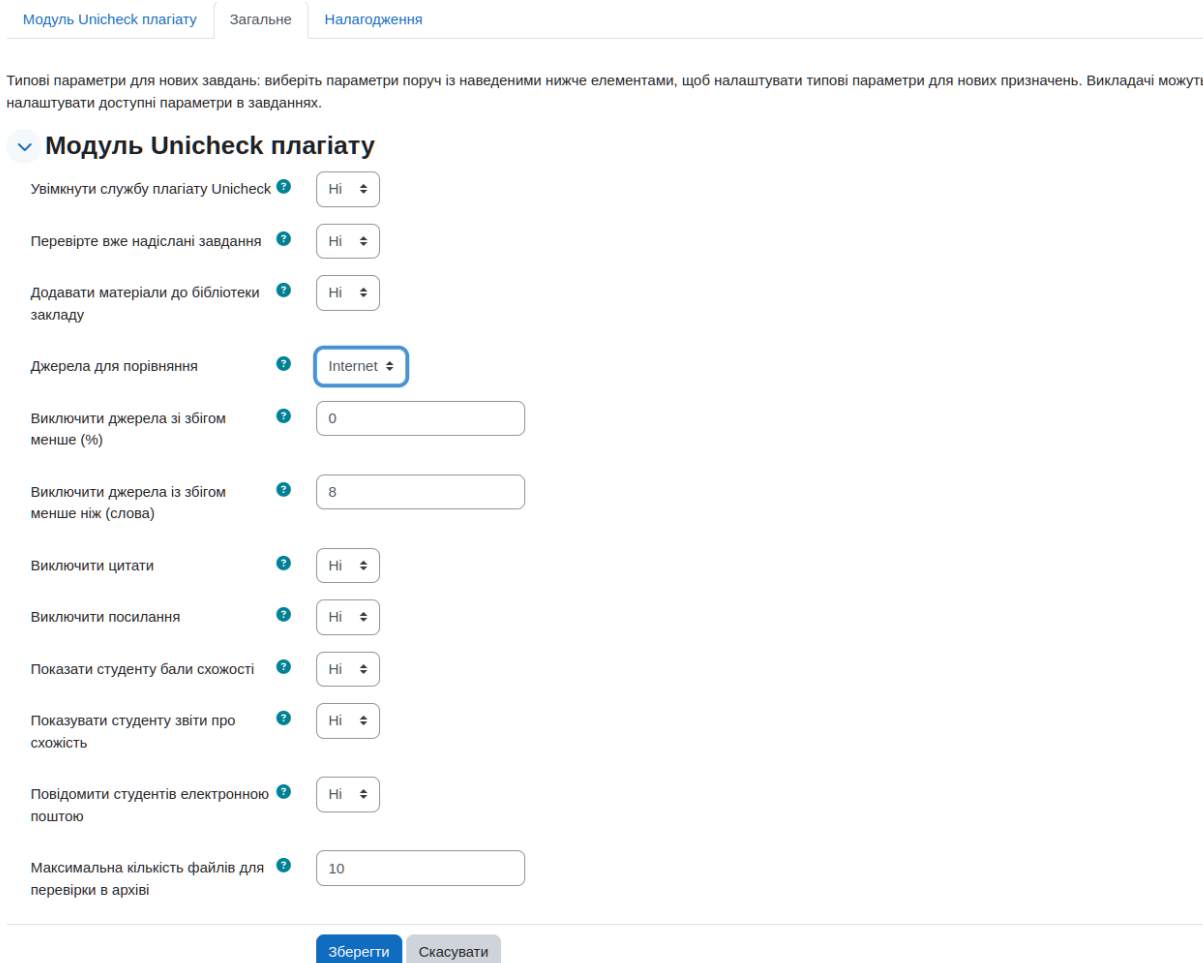


Рисунок 5 – Налаштування правил перевірки на плагіат в Moodle

Select	User picture	First name / Surname	Email address	Status	Grade	Edit	Last modified (submission)	File submissions	Submission comments
<input type="checkbox"/>		Nicole Betts	n.betts643@mailinator.com	Submitted for grading 74 days 11 hours late	Grade	Edit	Tuesday, 3 December 2019, 10:24 AM	Zapata_rail.docx UNICHECK ID:15000654 79.83% Report	Comments (0)
<input type="checkbox"/>		Audrey Jones	a.jones@mailinator.com	Submitted for grading Graded	Grade 50.00 / 100.00	Edit	Friday, 13 September 2019, 4:45 PM	assignment (styles+links).docx UNICHECK ID:12080751 29.61% Report Attention	Comments (0)

Рисунок 6 – Результати перевірки файлів на плагіат в діяльності Завдання

служить для нього «сирим необробленим матеріалом» і в якій дійсність і «цінність» хаотично переплетені і між ними немає впорядкованої взаємозв'язку. Ми сприймаємо (пізнаємо) людей і речі, що володіють цінністю або не володіють нею. І при цьому не віддаємо собі звіту в тому, що ми, суб'єкти спостереження, є джерелом ціннісних критеріїв, а не речі і люди - об'єкти цього спостереження. Обличчя людини, подібно німбу, світиться благородством. При погляданні гілок старого дуба ми відчуваємо священний трепет. Ми переконані в токсичності отруйної рослини і бачимо в ньому моральне зло.

Але у всіх проявах поняття культури, що перешкоджають або сприяють формуванню цінностей, що реалізують їх або вводять в оману в цьому зв'язку, завжди мається на увазі посилання на цінність. І таким чином, хоча культура сама по собі не є цінністю, але вона - об'єктивно існуюча даність, зміст і значення якої полягає у створенні цінності або, кажучи словами Штаммлера, «у пошуках істинного». Зі сказаного також випливає, що відноситься до цінності спосіб мислення є методологічним інструментом наук про культуру.

Право зрозуміле тільки в рамках категорій, що відносяться до цінності. **Право** - це елемент культури, тобто факт, що відноситься до категорії цінності. Поняття права не можна визначити інакше, ніж «даність», сенс якої полягає в реалізації ідеї права.

Право може бути несправедливим, але воно є правом оскільки, оскільки зміст його полягає в тому, щоб бути справедливим.

Сама ж ідея права є одночасно конститутивним принципом і критерієм цінності правової дійсності, служить елементом оцінює способу мислення.

Але навіть цей оцінюючий спосіб мислення не є останньою інстанцією в галузі права. Залишається ще можливість визнати ціннісну природу права і водночас у вищому сенсі, перед Богом, згідно Нагірної проповіді позбавленим

1

СХОЖІСТЬ 62.5%
Цитати 3.97%
Вилучення 0%

Всі джерела: Інтернет, Бібліотека

Всього знайдено: 20 | Вилучено: 0

- 42.7% філософія права модуль 1. Синюк Н.В..docx
- 29.0% Самостійна робота до модуля 1.docx (1)
- 28.2% самостійна робота (1).docx
- 12.8% Самостійна- філософія права.docx (2 джерела)
- 12.8% філософ мод1.docx
- 12.8% Модуль 1.docx
- 12.7% фп_мод1.docx
- 12.7% Самостійна робота_мод1_Філософ.docx
- 2.76% ФП Опорний конспект.docx
- 0.92% СР модуль 1 ФП.docx (1) (5 джерел)
- 0.20% dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456...
- 0.06% referat-ok.com.ua/politika-pollitologiya/legit...
- 0.05% eportfolio.kubg.edu.ua/data/conference/346...

Рисунок 7 – Перегляд повних результатів проведеної перевірки на плагіат

Якщо завантажений файл кваліфікаційної роботи магістранта потребує доопрацювання та повторної перевірки на плагіат, то відповідальний секретар має змогу надати повторну спробу для завантаження. Новий файл також буде перевірено на плагіат відразу.

Для призначення рецензента є можливість використати вбудований в Moodle модуль призначення оцінювачів у діяльності Завдання. Відповідальний секретар комісії із захисту

може призначити рецензента зі списку рецензентів цієї спеціальності. Відповідно, призначеному рецензенту буде надіслано повідомлення на електронну пошту із запрошенням до рецензування. Рецензент при переході до сторінки списку зданих робіт буде бачити лише роботи, де він призначений в якості рецензента.

Для того, щоб рецензування робіт було рівноцінним та підлягало однаковим критеріям, для рецензування задіюється ще один стандартний модуль в Moodle – спосіб оцінювання. Ми рекомендуємо включити методи Інструкції. При цьому варіанті попередньо готуються критерії рецензії, за якими рецензент оцінює роботу і пише власні висновки. В результаті цільна рецензія буде складатися з сумарного оцінювання за вказаними критеріями.

Після проведеного рецензування відповідальний секретар позначає роботу як допущену до захисту і доступ до роботи стає загальним. В результаті розміщені в модулі Завдання роботи стають доступними як у репозитарії. Загальна модель такої роботи показана на рис. 8.

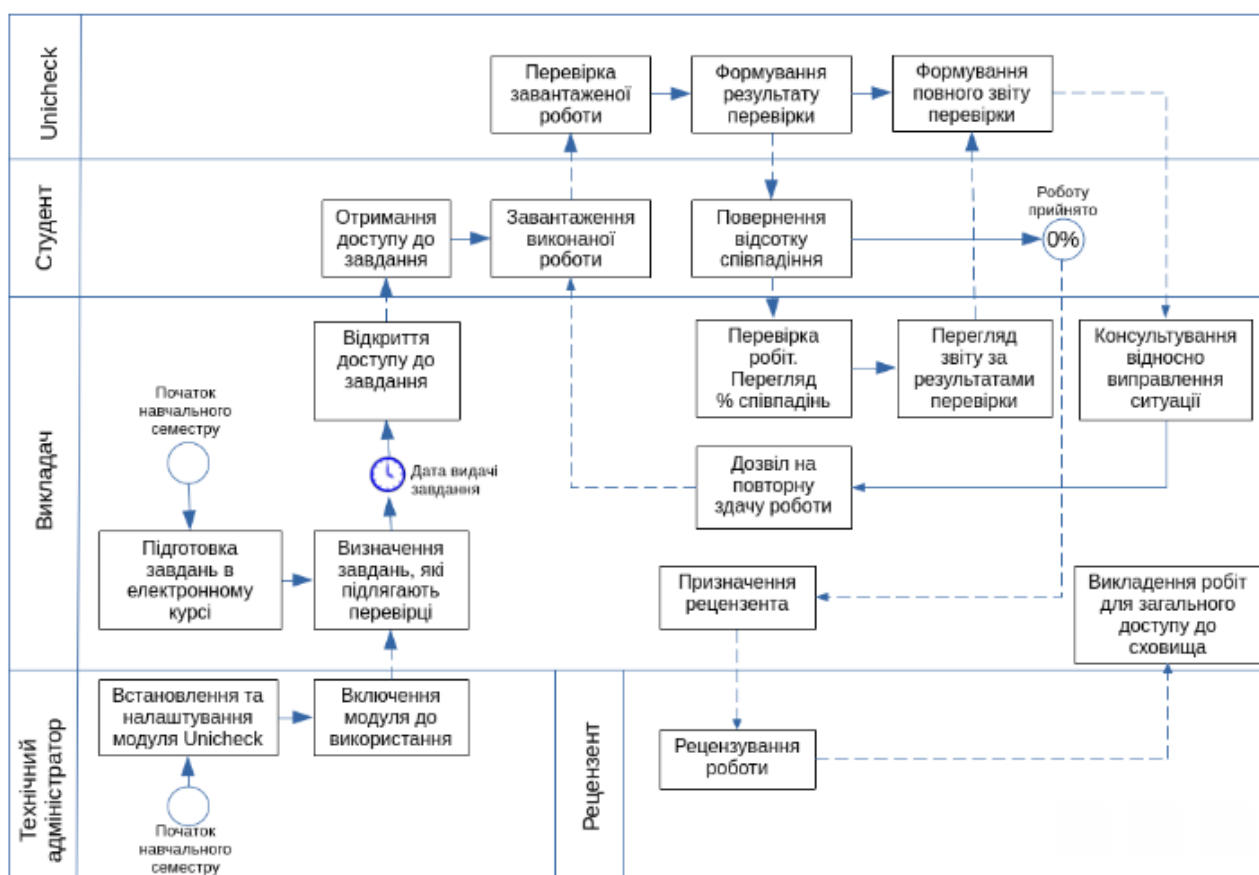


Рисунок 8 – Схема діяльності перевірки роботи на плагіат та розміщення в репозитарії після рецензування

Гнучка система налаштування ролей в Moodle дозволяє для такого середовища визначити всі визначені нами вище базові ролі (магістрант, науковий керівник, рецензент, відповідальний секретар комісії, представник деканату, член атестаційної комісії, відповідальний за ІКТ) та гнучко налаштувати доступ до різних елементів системи. Для версії Moodle 4 є понад 700 пунктів налаштування прав доступу для різних ролей. Окрім стандартних ролей, які вже закладено в системі, є можливість створити нові та надати їм необхідні права.

Також необхідно зауважити важливу деталь, за рахунок вже готових модулів інтеграції Moodle легко вбудовується в наявне інформаційно-освітнє середовище університету. За рахунок цього до системи підтримки оцінювання магістерських робіт легко підключити (чи синхронізувати) базу даних користувачів та організаційну структуру ЗВО (факультети, освітні програми тощо). Таким чином відпадає необхідність повторної реєстрації учасників процесу на новому ресурсі. В НУБіП України база користувачів побудована на основі бази

користувачів Google Workspace for Education і вже підключена до внутрішніх підсистем інформаційно-освітнього середовища університету: навчально-інформаційного порталу, порталу інтернет-конференцій, порталу студентських олімпіад, порталу підготовки абітурієнтів до вступу, низки віртуальних лабораторій та інших. Для захисту бази користувачів від безпосереднього втручання доступ до неї шифрується за протоколом TLS, сам сервер захований у внутрішній приватній мережі університету та приймає запити тільки від чітко визначених серверів та сервісів. На сьогодні база користувачів НУБіП України налічує 18667 студентів та 1378 викладачів.

Дискусії. Хоча запропонована нами модель інформаційної системи підтримки оцінювання магістерських робіт та приклад її технічної реалізації з використанням програмного забезпечення визначення текстових збігів (плагіат) від Unicheck, яка, на грудень 2024 рік полишає ринок України, на тих же організаційних підходах можна використати будь яку інше подібне програмне забезпечення. Так, новим популярним гравцем на ринку України з перевірки текстів на плагіат стає компанія Turnitin (<https://www.turnitin.com/>), яка пропонує свої послуги на заміну Unicheck. І вона також має інтеграцію з LMS Moodle.

Висновки. Використовуючи вже наявне в закладі вищої освіти відкрите програмне забезпечення, яке з легкістю інтегрується у вже створене інформаційно-освітнє середовище університету, можна швидко побудувати ще один необхідний модуль – систему підтримки оцінювання магістерських робіт відповідно до нормативних документів закладу вищої освіти та загальних рекомендацій щодо дотримання академічної доброчесності. В запропонованій системі для магістрантів створюються всі умови для зручної та ефективної роботи над їх магістерськими проектами, а збережена база робіт магістрів буде виконувати роль інституційного репозитарію виконаних магістерських робіт.

Подальший розвиток проєкт може отримати через створення нових необхідних модулів для платформи Moodle для забезпечення нових задач або удосконалення наявних. Враховуючи, що LMS Moodle є відкритим програмним забезпеченням, така робота може бути виконана будь-яким програмістом необхідного рівня кваліфікації.

Список використаних джерел

1. Bershadskaya, M., Voznesenskaya, Y., & Karpenko, O. (2016). Research webometrics: Ranking in the context of accessibility of higher education. *Universal Journal of Educational Research*, 4(7), 1506–1514. <https://doi.org/10.13189/ujer.2016.040702>.
2. Webometrics.info. (2024). 21st anniversary edition (2004-2024). https://www.webometrics.info/en/current_edition (available 1.07.2024).
3. Smyrnova-Trybulska, E., Morze, N., & Kuzminska, O. (2018). Academic information transparency: From teachers' e-portfolio to upgrading the rankings of universities. In *Distance Learning in Applied Informatics (DIVAI)* (pp. 347–358). Nitra, Slovakia.
4. Kuz'minskaya, E. G. (2014). *Informatsionnye tekhnologii i nauchnaya kommunikatsiya: instrumenty i modeli vnedreniya v usloviyakh universiteta* [Information technologies and scientific communication: tools and models of implementation at the university]. *Educational Technologies and Society*, 17(1), 447–456.
5. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Keesenberg, R., Tsoukala, V., Barbarossa, E., & Bjornsson, A. (Eds.). (2020). *Access to and preservation of scientific information in Europe: Report on the implementation of Commission recommendation C(2018)2375 final*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/950244>.
6. Eaton, S. E. (2021). Plagiarism in higher education: Tackling tough topics in academic integrity. *ABC-CLIO*. <https://doi.org/10.5040/9798400697142>.
7. Levine, J., & Pazdernik, V. (2018). Evaluation of a four-prong anti-plagiarism program and the incidence of plagiarism: A five-year retrospective study. *Assessment & Evaluation in Higher Education*, 43(7), 1094–1105. <https://doi.org/10.1080/02602938.2018.1434127>.

8. Comas-Forgas, R., Lancaster, T., Calvo-Sastre, A., & Sureda-Negre, J. (2021). Exam cheating and academic integrity breaches during the COVID-19 pandemic: An analysis of internet search activity in Spain. *Heliyon*, 7(10), e08233. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08233>.
9. Striepe, M., Thomson, S., & Sefcik, L. (2023). Understanding academic integrity education: Case studies from two Australian universities. *Journal of Academic Ethics*, 21, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10805-021-09429-x>.
10. Li, X., Zhao, J., & Yan, W. (2022). Integrity levels of Chinese college students: An analysis of influencing factors. *Frontiers in Education*, 7. <https://doi.org/10.3389/educ.2022.843674>.
11. Fudge, A., Ulpen, T., Bilic, S., et al. (2022). Does an educative approach work? A reflective case study of how two Australian higher education enabling programs support students and staff uphold a responsible culture of academic integrity. *International Journal for Educational Integrity*, 18(5). <https://doi.org/10.1007/s40979-021-00099-1>.
12. Almusawi, H. (2019). Paper review: Protecting students' intellectual property in the web plagiarism detection process. *International Journal of Teaching and Education*, 7(1), 1–6. <https://doi.org/10.52950/TE.2019.7.1.001>.
13. de Bruijn, E., van der Marel, I., & Munneke, L. (2022). Supervising graduation projects in higher professional education: A literature review. *Educational Research Review*, 37, 100462. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2022.100462>.
14. de Kleijn, R. A. M., Mainhard, M. T., Meijer, P. C., Brekelmans, M., & Pilot, A. (2013). Master's thesis projects: Student perceptions of supervisor feedback. *Assessment & Evaluation in Higher Education*, 38(8), 1012–1026. <https://doi.org/10.1080/02602938.2013.777690>.
15. Jugder, N. (2019). Reviewing the quality of master's dissertations. University of Leeds. <https://doi.org/10.48785/100/239>.
16. Aghaee, N., & Keller, C. (2016). ICT-supported peer interaction among learners in Bachelor's and Master's thesis courses. *Computers & Education*, 94, 276–297. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.11.006>.
17. Björk, B.-C. (2007). A model of scientific communication as a global distributed information system. *Information Research*, 12(2), 307. <http://InformationR.net/ir/12-2/paper307.html>.
18. Hlazunova, O. H., Mokriiev, M. V., Kuzminska, O. H., & Yakobchuk, O. V. (2018). Arkhitektura hibrydnoho khmaro-orientovanoho seredovyscha navchalnoho zakladu [Architecture of a hybrid cloud-oriented environment of an educational institution]. *Kompyrnt*.
19. Centre for Learning & Performance Technologies. (2023). Top tools for learning 2023: Top tools by category. <https://optools4learning.com/top-tools-by-category/> (available 1.07.2024).

Kuzminska Olena

*Habilitated Doctor, Professor, Information Systems and Technologies Department,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8849-9648>

E-mail: o.kuzminska@nubip.edu.ua

Mokriev Maksym

*PhD in economics, Associate Professor, Information Systems and Technologies Department,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6717-3884>

E-mail: m.mokriiev@nubip.edu.ua

INFORMATION SYSTEM TO SUPPORT ASSESSMENT OF MASTER'S THESIS: AN EXAMPLE OF IMPLEMENTATION IN THE DIGITAL EDUCATIONAL ENVIRONMENT OF A HIGHER EDUCATION INSTITUTION

Abstract. The digitization of education increasingly impacts fundamental business processes within modern higher education institutions. This study exemplifies the digitalization of specific processes involved in the preparation and presentation of master's thesis results. We have developed an information system designed to support the evaluation of

master's theses through expert assessment and automated plagiarism detection, adhering to institutional regulations and general guidelines on academic integrity. Key business processes include user management, master's thesis evaluation management, and dissemination of research outcomes. These processes were decomposed following standards of structural and functional analysis and design, incorporating role assignment for potential system users. We propose implementing this system using the LMS Moodle platform, which facilitates resources for thesis text submission, document downloads, peer reviews, student counseling, and communication among educational stakeholders based on defined roles. Integration of the Unicheck plagiarism detection module within LMS Moodle enables efficient text similarity checks. Leveraging Learning Tools Interoperability (LTI) technology supported by LMS Moodle, electronic educational resources from the university's educational and informational portal can be seamlessly integrated with the master's theses repository. The study emphasizes that establishing an information and educational environment within a higher education institution and consolidating a unified user base will streamline the implementation of the proposed information system both organizationally and technologically, minimizing costs.

Keywords: *information system, master's thesis, assessment, plagiarism check software, LMS Moodle*

УДК 330.46:378:004.65

Костенко Інна Сергіївна

Доктор філософії за спеціальністю «Економіка», доцент, старший викладач кафедри економічної кібернетики,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4987-3764>

E-mail: kostenkois@nubip.edu.ua

Клименко Євгеній Олегович

Здобувач освітнього ступеня PhD за спеціальністю «Комп'ютерні науки»,

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6353-6015>

E-mail: ye.klymenko@nubip.edu.ua

Харченко Володимир Віталійович

Кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри економічної кібернетики,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5067-7181>

E-mail: vkharchenko@nubip.edu.ua

АНАЛІЗ ОСВІТНЬОЇ ПРОПОЗИЦІЇ ДЛЯ ВСТУПУ В ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ В 2024 РОЦІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ POWER BI

Анотація. У статті представлено аналіз вступної кампанії до ЗВО в 2024 році, досліджено залежність між кількістю поданих заяв вступників до закладів вищої освіти України та показниками, що характеризують освітні пропозиції. Аналіз проведено на основі даних Єдиної державної електронної бази з питань освіти (ЄДЕБО) за 2024 рік із застосуванням кореляційно-регресійного методу. Показано, що між обсягом освітніх пропозицій і кількістю заяв ЗВО існує сильний позитивний зв'язок, а лінійна регресія дозволяє кількісно представити залежність, що пояснює майже 50% вибірки. У статті розглянуто вплив зовнішніх факторів, зокрема регіонального розташування та віддаленість зони активних бойових дій, рейтинг ЗВО на кількість заяв. Представлено структуру розподілу рекомендованих місць для вступу за умовами вступу. Проведені дослідження відображають особливості формування попиту послуг ЗВО за результатами вступної кампанії 2024 р., а також дозволяють оптимізувати підходи до планування освітніх програм, підвищити ефективність роботи закладів вищої освіти України.

Ключові слова: освітня пропозиція, заклади вищої освіти, вступ, спеціальність, ЄДЕБО, кореляційна залежність, лінійна регресія.

Актуальність. В умовах сучасних викликів, зокрема війни, внутрішньої міграції населення та змін на ринку праці, реформування системи вищої освіти України, заклади вищої освіти стикаються із необхідністю адаптації своїх освітніх пропозицій до нових реалій. Знання про те, як кількість та різноманітність спеціальностей впливають на вибір вступників, є ключовим для стратегічного планування діяльності ЗВО. Особливо це важливо в контексті сучасних викликів, пов'язаних із зміною регіонального розподілу попиту на освіту.

В 2024 році до закладів вищої освіти було подано понад 783 тис. заяв, здійснювався набір на 113 спеціальностей. В відкритих реєстрах ЄДЕБО станом на початок грудня 2024 року наявні дані щодо вступу для 228 ЗВО: набір здійснювався на умовах широкого конкурсу (загальних умовах – 66,24%), фіксованої пропозиції (24,63%), за пільгами було надано майже 25% рекомендацій щодо вступу [1].

Значний вплив на обсяг заяв щодо вступу має наявність популярних спеціальностей. Популярними протягом останніх 5-ти років лишаються 073 Менеджмент, 122 Комп'ютерні науки, 121 Інженерія ПЗ, 035 Філологія, 053 Психологія, 081 Право, 075 Маркетинг. Набирає популярності 125 Кібербезпека та захист інформації. В таких умовах оптимізація структури освітніх програм є критично важливою для забезпечення сталого функціонування університетів, збереження їх конкурентоспроможності та задоволення потреб вступників. Відповідно, актуальним є дослідження взаємозв'язку між обсягом освітніх пропозицій, які

пропонуються закладами вищої освіти, та обсягом поданих заяв вступників. Важливу роль грає своєчасне реагування на зміну в попиті на освітні послуги ЗВО, залучення маркетингових інструментів та дослідження різних соціально-економічних чинників [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблематика вибору вступниками закладів вищої освіти та спеціальностей досліджується як вітчизняними, так і зарубіжними науковцями. За кордоном значна частина досліджень вказує на вплив централізованих систем прийому, які можуть сприяти зменшенню нерівності в доступі до освіти, проте водночас виявляють невідповідність між кількістю місць та попитом [2,3]. Зростання ролі технологій у вищій освіті, як-от онлайн-програми, показує перспективу розширення доступу для менш забезпечених студентів. Разом із тим, елітні заклади часто обмежують кількість місць, що посилює конкуренцію серед абітурієнтів [4, 5]. Дослідження також підкреслюють вплив політики реформ, що централізує або децентралізує прийом, а також адаптує його до регіональних особливостей [6,7].

В Україні коло фокус досліджень зосереджений на аналізі факторів, що впливають на вибір університету, такі як його рейтинг, географічне розташування, наявність певних спеціальностей та форм навчання, вартість навчання, суб'єктивні оцінки вступників тощо [8,9]. Дослідження показують, що розширення спектру освітніх пропозицій може підвищити привабливість ЗВО для потенційних вступників [10].

Аналіз представлених вітчизняних джерел також свідчить про активний інтерес науковців до взаємозв'язку між ринком освітніх послуг та ринком праці в Україні. Значна увага приділяється готовності закладів вищої освіти (ЗВО) до сучасних викликів, зокрема цифрової економіки та інноваційного навчання. Дослідження також висвітлюють дисбаланс між попитом на спеціалістів та пропозицією освітніх програм. Особливо актуальними є питання маркетингового аналізу для підвищення конкурентоспроможності ЗВО та оптимізації фінансових моделей [11, 12, 13]. Ключовими напрямками є використання інформаційно-комунікаційних технологій у навчальному процесі [14], моніторинг освітнього попиту та пропозиції [13], а також законодавче забезпечення розвитку освітнього ринку [9, 10]. Важливою є гармонізація ринку праці та освітніх послуг через інноваційні методи навчання й стратегічне планування програм ЗВО [15].

Загалом, проведені дослідження сприяють розумінню механізмів адаптації освітніх закладів до потреб сучасного суспільства та ринку праці. в українському контексті, особливо в умовах сучасних соціально-економічних та політичних викликів, ця тема потребує подальшого вивчення з використанням актуальних даних.

Мета дослідження полягає у встановленні кількісного взаємозв'язку між освітніми пропозиціями, які пропонуються закладами вищої освіти, та кількістю поданих заяв вступників на основі статистичних методів аналізу, а також визначенні чинників, що впливають на популярність університетів.

Матеріали і методи дослідження. У дослідженні використано дані ЄДЕБО за 2024 рік щодо вступної кампанії та характеристик ЗВПО, а також інформація про рейтинги університетів ТОП-200 з Освіта.Юа [1, 16]. Проведено кореляційно-регресійний аналіз для встановлення взаємозв'язку між кількістю поданих заяв та характеристиками освітніх пропозицій. Для обробки та візуалізації даних використано програмне забезпечення Power BI.

Результати дослідження та їх обговорення. Аналіз регіональної структури попиту і пропозиції для ЗВПО свідчить про концентрацію попиту на освіту у великих містах, таких як Київ, Львів, Харків та Дніпро, тоді як регіони, що зазнали воєнного впливу, демонструють значне зниження кількості заяв. У середньому, на один заклад освіти у місті Києві припадає близько 5 916 заяв, тоді як у окремих областях цей показник становить лише 2 543 заяви. Найбільший обсяг заяв зафіксовано, не зважаючи на міграційні процеси останніх 3х років, у місті Києві загальна кількість поданих заяв становить, що складає близько 20% від загального обсягу по країні. Львівська область, посідає друге місце за популярністю з показником, обсяг заяв майже вдвічі менше за Київ, проте суттєво випереджає інші регіони, далі за попитом Харківська область, що підтверджує її стабільну позицію одного з провідних освітніх центрів

країни. Вищу концентрацію поданих заяв на один ЗВО порівняно з іншими регіонами демонструє Вінницька область. Варто відзначити низькі показники у регіонах, які зазнають безпосереднього впливу воєнних дій. У Херсонській області кількість поданих заяв становить 5 182, що також є мінімальним показником серед регіонів із кількома закладами освіти (рис. 1).

Структура обсягу ЗВО та поданих заяв в 2024 році

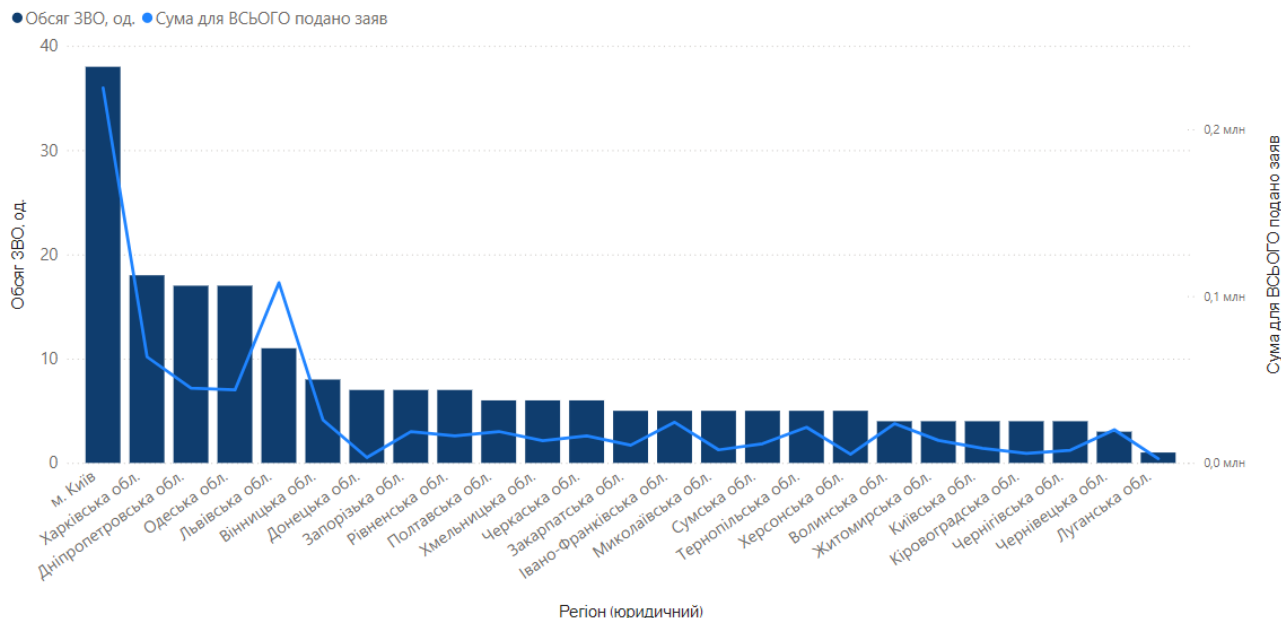


Рисунок 1 – Структура обсягу ЗПО та поданих заяв для вступу в 2024 році

Серед західних регіонів України особливу увагу привертають Волинська та Івано-Франківська області, які демонструють високі результати щодо обсягу заяв, попри наявність меншої кількості закладів вищої освіти. Це свідчить про зміщення освітнього попиту до регіонів, що мають порівняно безпечніші умови для навчання. Ці тенденції підкреслюють важливість регіональної безпеки та доступності освітніх можливостей для абітурієнтів у 2024 році.

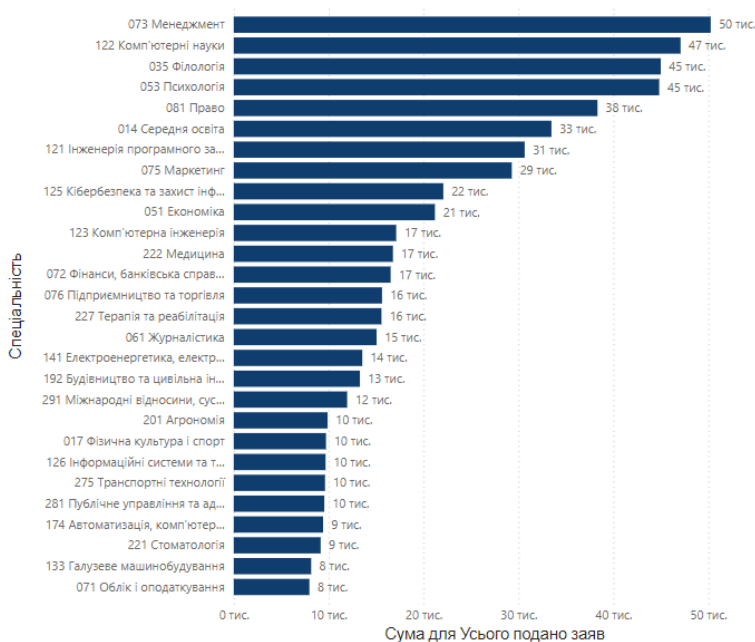
Щодо середнього конкурсного балу за регіонами, він варіюється в межах від 153 до 165 балів. Найвищі показники в м. Київ, Одеській, Харківській, Львівській областях.

За результатами аналізу поданих заяв за окремими спеціальностями у 2024 році спостерігаються чіткі тенденції щодо розподілу попиту серед абітурієнтів (рис. 2). Найбільша кількість заяв була подана на спеціальності, що належать до технічних і гуманітарних напрямів. Лідерами серед усіх спеціальностей стали: Філологія (36 759 заяв), Менеджмент (36 561 заява), Психологія (36 427 заяв), Комп'ютерні науки (31 252 заяви) та Право (26 069 заяв). Популярність цих напрямів пояснюється їхньою затребуваністю на ринку праці, а також широким спектром професійних можливостей для випускників. Разом ці спеціальності забезпечують понад 30% загального обсягу заяв по країні.

Середній бал вступників на популярні спеціальності свідчить про високий рівень конкуренції. Наприклад, для спеціальності "Менеджмент" середній бал становить 188,4, для "Маркетингу" – 187,7, а для "Філології" – 177,6. Водночас спеціальності, що належать до природничих наук і технічних напрямів, демонструють нижчі середні показники балів. Наприклад, для "Прикладної механіки" середнє значення становить 147,8, а для "Галузевого машинобудування" – 146,6. Це може свідчити про певний дефіцит високобалльних абітурієнтів на інженерно-технічні спеціальності, попри їх важливість для розвитку економіки країни. Особливо варто відзначити спеціальності, пов'язані з ІТ-сферою, такі як "Інженерія програмного забезпечення" (22 080 заяв), "Комп'ютерні науки" (31 252 заяви) та "Кібербезпека" (17 083 заяви). Ці напрями є стратегічно важливими в контексті глобальної

цифровізації та забезпечення національної кібербезпеки. Середній бал вступників на ці спеціальності становить близько 170 балів, що свідчить про значний інтерес серед абітурієнтів і відповідно високий рівень підготовки кандидатів. Менш популярними серед вступників залишаються спеціальності, що стосуються машинобудування, екології та транспортних технологій. Наприклад, "Суднобудування" отримало лише 243 заяв, а "Гірництво" — 900 заяв при середніх балах у межах 146–149. Це вказує на необхідність додаткової промоції цих напрямів з боку закладів вищої освіти, а також стимулювання інтересу абітурієнтів через державні програми підтримки та грантові ініціативи.

Сума для Усього подано заяв за категорією Спеціальність



Сума для Усього подано заяв за категорією Освітній ступінь і Форма навчання



Сума для Усього подано заяв за категорією Освітній ступінь і Вступ на основі

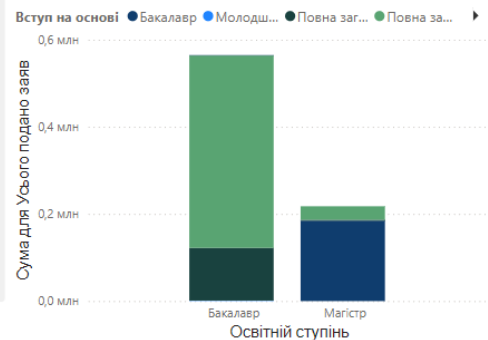


Рисунок 2 – Структура заяв щодо вступу до ЗВО в 2024 році

Аналіз поданих заяв за освітніми ступенями та формами навчання у 2024 році демонструє чіткі пріоритети вступників щодо здобуття вищої освіти. Найбільший обсяг заяв припадає на ступінь бакалавра за денною формою навчання, що становить понад 549 тис. заяв, що вказує на домінуючий попит серед абітурієнтів на отримання базової вищої освіти у традиційній формі. Значно нижчий рівень зацікавленості спостерігається у заочній формі навчання: для бакалаврату було подано понад 15 тис. заяв, що свідчить про зменшення популярності цієї форми навчання, ймовірно, через зростаючі вимоги до очної підготовки та інтеграції у навчальні процеси.

Дані про вступ на основі попереднього рівня освіти деталізують тенденції щодо шляхів здобуття освітніх ступенів. Найбільша кількість заяв на бакалаврат була подана на основі повної загальної середньої освіти та НРК5, підтверджуючи основний потік вступників після завершення середньої закладів середньої освіти. Вступ на магістерські програми переважно відбувається на основі ступеня бакалавра. Дані свідчать про перевагу стандартних освітніх траєкторій, а також стабільний інтерес до продовження навчання серед випускників бакалаврату, що є важливим фактором для планування розвитку освітньої системи в Україні.

Проведено дослідження базових внутрішніх та зовнішніх факторів впливу на обсяг заяв щодо вступу до ЗВО. Було обрано дані щодо обсягу поданих заяв, форми власності, регіону, віддаленості від зони бойових дій, рейтингу ЗВО, а також обсягу освітніх пропозицій, що були представлені для вступників в 2024 році, які включали перелік спеціальностей, форму навчання та базу вступу без форми фінансування. Кореляційний аналіз дозволив оцінити силу та напрямок взаємозв'язків між обсягом заяв і ключовими чинниками (табл.1).

Таблиця 1 – Результати кореляційного аналізу для характеристик освітніх пропозицій ЗВО в 2024 році

Показник	Обсяг заяв ЗВО	Рейтинг ЗВО	Регіон (Юр.)	Форма власності	Обсяг освітніх пропозицій	Віддаленість від зони бойових дій
Обсяг заяв ЗВО	1.0000	-0.0953	0.0200	-0.0738	0.6926	-0.0215
Рейтинг ЗВО	-0.0953	1.0000	—	—	—	—
Регіон (Юр.)	0.0200	—	1.0000	—	—	—
Форма власності	-0.0738	—	—	1.0000	—	—
Кількість представлених спец.	0.6926	—	—	—	1.0000	—
Зона впливу війни (узагальнений)	-0.0215	—	—	—	—	1.0000

Найбільший позитивний кореляційний зв'язок спостерігається між кількістю представлених спеціальностей та обсягом заяв ($r=0.6926$). Це свідчить про те, що різноманітність освітніх пропозицій відіграє ключову роль у залученні вступників, оскільки більший вибір спеціальностей, освітніх програм забезпечує ширші можливості для абітурієнтів, що підвищує привабливість ЗВО. Натомість слабкий негативний кореляційний зв'язок виявлено між обсягом заяв та рейтингом закладу ($r=-0.0953$), що може вказувати на те, що високий рейтинг не завжди є визначальним фактором для вибору ЗВО, особливо в умовах регіональних особливостей та поточної ситуації в країні. Форма власності закладу вищої освіти демонструє також незначний негативний зв'язок ($r=-0.0738$), що підтверджує перевагу державних закладів у виборі вступників порівняно з приватними установами. Вплив регіону та віддаленості від зони бойових дій виявився мінімальним ($r=0.02$ та $r=-0.0215$ відповідно), що свідчить про відносну стійкість попиту на вищу освіту в регіонах, незалежно від їхньої географічної віддаленості, хоча частково цей фактор може нівелюватися внутрішньою міграцією населення. Такі показники можна пояснити швидкою адаптацією ЗВО до надання освітніх послуг із застосуванням цифрових технологій тощо.

Варто зазначити, про те, що попри ряд переваг застосування Power BI для обробки, аналізу та візуалізації великих даних, для кореляційного аналізу відсутня окрема функція, тому було створено ряд окремих мір (заходів), які узагальнені потім в таблицю. На рис. 3 наведено приклад міри для встановлення кореляційного зв'язку.

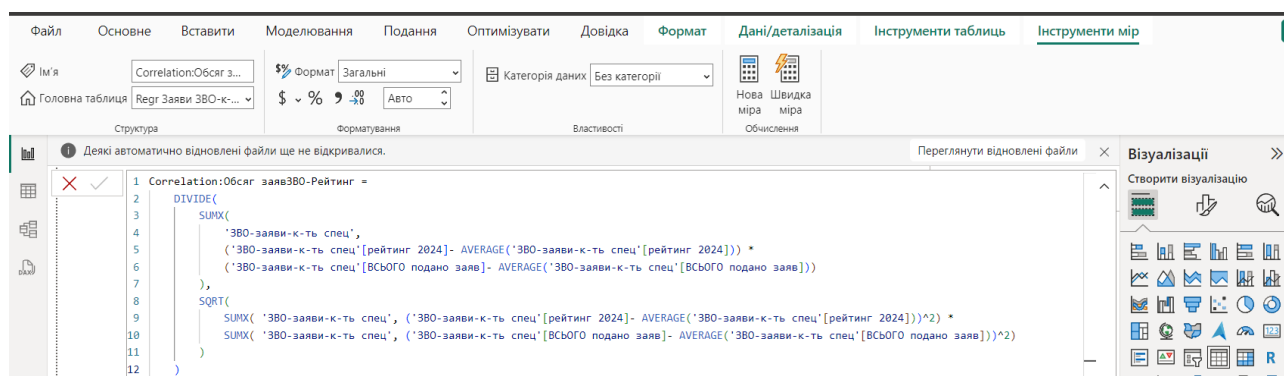


Рисунок 3 – Приклад міри для встановлення кореляційного зв'язку

За результатами кореляційного аналізу було визначено параметри для подальшої побудови регресійної моделі. Було застосовано функцію LINEST для формування показників рівняння регресії та параметрів адекватності моделі. Нижче приклад застосування функції LINEST для формування параметрів регресійної моделі.

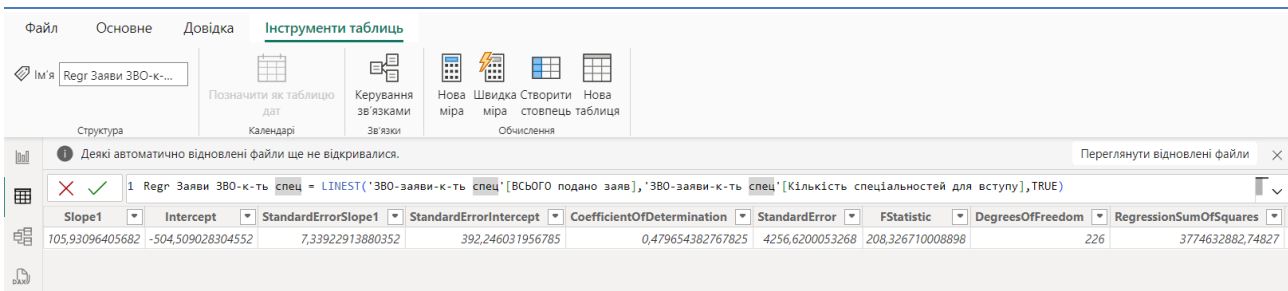


Рисунок 4 – Приклад застосування функції LINEST для формування параметрів регресійної моделі

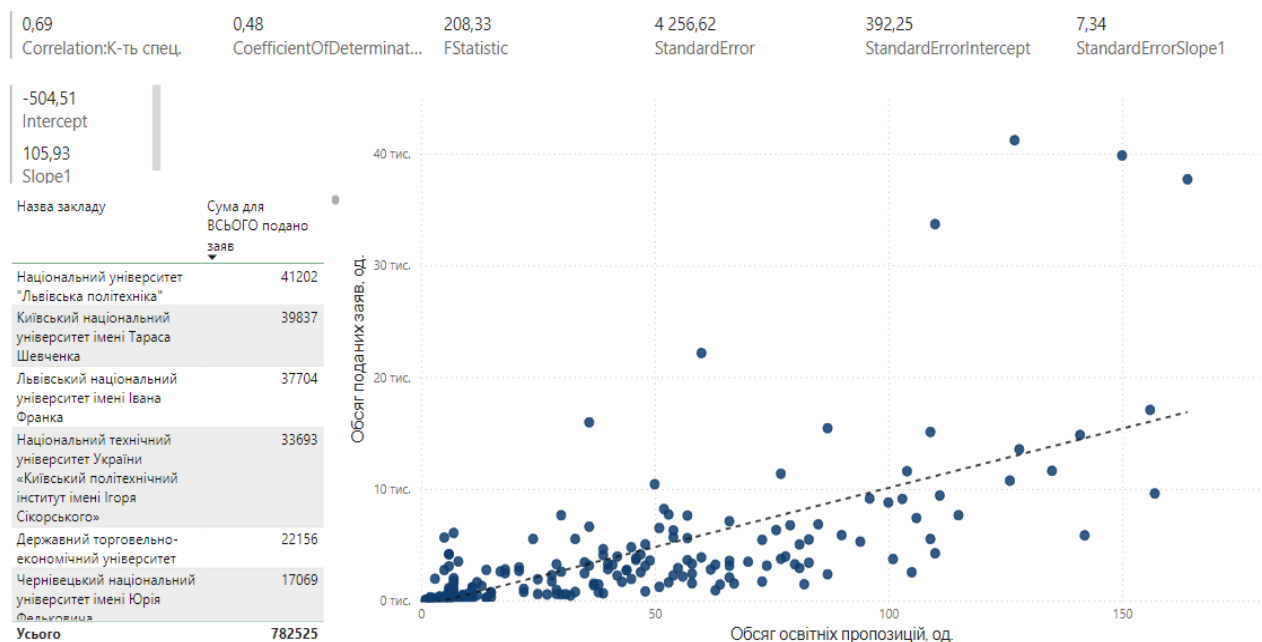


Рисунок 5 – Результати кореляційно-регресійного аналізу обсяг поданих заяв щодо вступу до ЗВО – обсяг освітніх пропозицій ЗВО в 2024 році

Аналіз показав, що між кількістю освітніх пропозицій та кількістю заяв вступників існує помірний позитивний зв'язок, про що свідчить коефіцієнт кореляції $r = 0,69$. Розроблено рівняння лінійної регресії:

$$y = 105,93 x_1 - 504,51, \quad (1)$$

де y – кількість поданих заяв до ЗВО, x_1 – кількість освітніх пропозицій.

Коефіцієнт нахилу регресії показує, що зі збільшенням обсягу спеціальностей на 1 одиницю кількість заяв на вступ зростає в середньому на 105,93 заяви; Вільний член моделі, який інтерпретується лише умовно, оскільки для реального контексту обсяг спеціальностей не може дорівнювати нулю.

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,48$ вказує, що 48% варіації кількості заяв пояснюється змінами в кількості спеціальностей. F-статистика (208,33) підтверджує статистичну значущість моделі при рівні значущості $\alpha = 0,05$. Аналіз еластичності показав, що збільшення кількості спеціальностей на 1% призводить до збільшення кількості заяв на 0,69%, що свідчить про високу чутливість вступників до розширення освітніх пропозицій. Дослідження також показало, що провідні університети, такі як Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського", Львівський національний університет імені Івана Франка та Національний університет "Львівська політехніка", мають високі показники як за кількістю освітніх пропозицій, так і за кількістю заяв, що підтверджує результати моделі. Це сигналізує вплив інших факторів, таких як встановлені базові уявлення про репутацію ЗВО, роль маркетингових інструментів, інші соціально-економічні чинники, що потребують кількісного дослідження на обґрунтування.

Повертаючись до структури освітніх пропозицій, а саме переліку популярних спеціальностей (комп'ютерні науки, менеджмент, право та інженерія програмного забезпечення), варто зазначити, що вони представлені у понад 70% університетів, що беруть участь у дослідженні. Аналіз показав, що університети, які мають у своєму переліку ці спеціальності, отримують у середньому на 20% більше заяв, ніж заклади, які орієнтуються на лише гуманітарні напрями. Тому подальше дослідження має враховувати сегментацію вступників за їх інтересами щодо освітніх пропозицій, а саме спеціальностей.

В цілому розширення кількості спеціальностей та форм навчання (освітніх пропозицій) може стати стратегічним кроком для підвищення привабливості університетів. Поряд з тим такі питання тісно пов'язані з питаннями фінансування, та інфраструктурними умовами тощо. Важливу роль грає маркетинг освітніх програм: ЗВО з меншими показниками можуть підвищити кількість заяв через промоцію освітніх можливостей, проте далеко не всі з них використовують раціонально цифрові маркетингові інструменти.

Висновки і перспективи. Проведений аналіз освітніх пропозицій та обсягу поданих заяв до закладів вищої освіти України у 2024 році продемонстрував ключові закономірності та фактори, що впливають на популярність ЗВО серед вступників. Найсильніший позитивний кореляційний зв'язок виявлено між кількістю освітніх пропозицій (переліком спеціальностей) та кількістю поданих заяв ($r = 0.69$), що підтверджує критичну роль різноманітності освітніх програм у залученні абітурієнтів. Лінійна регресія дозволила встановити залежність, згідно з якою збільшення кількості спеціальностей на 1 одиницю забезпечує зростання кількості заяв на 105.93, а показник еластичності (0.69%) вказує на високу чутливість вступників до розширення освітніх можливостей. Водночас рейтинг закладу та форма власності мають незначний негативний вплив, що свідчить про те, що традиційні чинники репутації не завжди є ключовими у виборі університету в сучасних реаліях. Аналіз географічного розподілу заяв виявив суттєву концентрацію попиту на освіту у великих містах (Київ, Львів, Харків), тоді як регіони, що зазнали безпосереднього впливу воєнних дій, демонструють значно нижчі показники.

Перспективи подальших досліджень включають детальний аналіз факторів, що зумовлюють вибір конкретних спеціальностей, а також дослідження сегментації абітурієнтів за інтересами до освітніх програм. Важливим напрямом є вивчення динаміки попиту на технічні, економічні та IT-напрями в умовах цифровізації та змін на ринку праці. Окрім цього, необхідно приділити увагу оптимізації структури освітніх пропозицій у ЗВО регіонів, які постраждали від воєнних дій, та розробці стратегій залучення вступників через державні програми підтримки та інноваційні маркетингові інструменти. Створення більш адаптивних освітніх програм з урахуванням регіональних потреб і тенденцій ринку праці сприятиме підвищенню конкурентоспроможності ЗВО та забезпеченню сталого розвитку системи вищої освіти в Україні.

Список використаних джерел

1. Unified State Electronic Database on Education. (2024). Admission campaign 2024. Retrieved from <https://vstup.edbo.gov.ua>.
2. Carranza, J. E., & Ferreyra, M. M. (2019). Increasing higher education access: Supply, sorting, and outcomes in Colombia. *Journal of Human Capital*. <https://doi.org/10.1086/701435>.
3. Bo, S., Liu, J., Shiu, J. L., Song, Y., & Zhou, S. (2019). Admission mechanisms and the mismatch between colleges and students: Evidence from a large administrative dataset from China.

- Economics of Education Review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272775718300712>. <https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2018.12.004>.
4. Goodman, J., Melkers, J., & Pallais, A. (2019). Can online delivery increase access to education? *Journal of Labor Economics*. <https://doi.org/10.1086/698895>.
 5. Blair, P. Q., & Smetters, K. (2021). Why don't elite colleges expand supply? NBER Working Paper Series. <https://ssrn.com/abstract=3931832>.
 6. Mello, U. (2022). Centralized admissions, affirmative action, and access of low-income students to higher education. *American Economic Journal: Economic Policy*. <https://doi.org/10.1257/pol.20190639>.
 7. Zancajo, A. (2020). Schools in the marketplace: Analysis of school supply responses in the Chilean education market. *Educational Policy*. <https://doi.org/10.1177/0895904819881781>.
 8. Klymenko, N. A., Kostenko, I. S., & Bielous, A. O. (2023). Analysis of demand for educational services of Ukrainian higher education institutions under modern challenges. *Business Inform*, (10), 174–183. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-10-174-183>.
 9. Skrypnyk, A. V., & Kostenko, I. S. (2020). Econometric analysis of demand and supply of educational services in the specialty 051 "Economics". *Business Inform*, (4), 279–288. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-4-279-288>.
 10. Nehrey, M., Klymenko, N., & Kostenko, I. (2023). Formal and non-formal education of Ukraine: Analysis of the current state and the role of digitalization. In *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies* (Vol. 181, pp. 1085–1098). https://doi.org/10.1007/978-3-031-36118-0_92.
 11. Sadova, U. Y., Stepura, T. M., & Korytska, O. I. (2021). Assessment of readiness of higher education institutions in Ukraine to challenges of the digital economy (using economic specialties as an example). *Business Inform*, 12(527), 79–86. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2021-12-79-86>.
 12. Kucherenko, I., & Yudenkova, O. (2024). Qualification gap in the education ecosystem and labor market of Ukraine. *Bulletin of Postgraduate Education: Collection of Scientific Papers. Series "Pedagogical Sciences"*, 28(57), 103–122. <https://ojs.uem.edu.ua/index.php/vpo/article/view/706>.
 13. Zhabenko, O. (2023). Monitoring of demand and supply of higher education specialists. In *Theoretical Foundations and Leading Foreign Experience of Higher Education and Labor Market Interaction under Wartime and Postwar Recovery in Ukraine: Preprint (Analytical Materials)* (pp. 44–61). Kyiv: Institute of Higher Education of the National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine. https://ihed.org.ua/wp-content/uploads/2024/02/Vzayemodiya-VO-ta-rynku-pratsi_IVO-2023-142p.pdf.
 14. Mann, R. V., Kravchenko, O. V., & Hanzhala, I. V. (2020). Information technologies and learning tools. *ITLT*, 78(4), 145–162. <https://doi.org/10.33407/itlt.v78i4.2810>.
 15. Hlazunova, O., Schlauderer, R., Korolchuk, V., Voloshyna, T., Sayapina, T., Kostenko, I., & Zolotukha, R. (2024). Implementation of microlearning technology for economics students through online courses. *ITLT*, 100(2), 110–121. <https://doi.org/10.33407/itlt.v100i2.5554>.
 16. Osvita.ua. (2024). University rankings TOP-200. Retrieved from <https://osvita.ua> (available 1.07.2024).

Kostenko Inna

PhD in Economics, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department of Economic Cybernetics,

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4987-3764>

E-mail: kostenkois@nubip.edu.ua

Klymenko Yevhenii

PhD student in Computer Science,

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6353-6015>

E-mail: ye.klymenko@nubip.edu.ua

Kharchenko Volodymyr

PhD in Economics, Associate Professor, Acting Head of the Department of Economic Cybernetics

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5067-7181>

E-mail: vkharченко@nubip.edu.ua

ANALYSIS OF THE EDUCATIONAL OFFER FOR ADMISSION TO HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS IN 2024 USING POWER BI

Abstract. *The article presents an analysis of the 2024 admission campaign to higher education institutions (HEIs) in Ukraine, investigating the relationship between the number of applications submitted by applicants and indicators characterizing educational offerings. The analysis was conducted using data from the Unified State Electronic Database on Education (USEDE) for 2024, applying the correlation-regression method. It is shown that there is a strong positive relationship between the volume of educational offerings and the number of applications to HEIs, while linear regression allows for a quantitative representation of this dependence, explaining nearly 50% of the sample. The article examines the impact of external factors, such as regional location, proximity to active combat zones, and HEI rankings, on the number of applications. The structure of the distribution of recommended places for admission under specific admission conditions is also presented. The conducted research reflects the peculiarities of demand formation for HEI services based on the results of the 2024 admission campaign and allows for optimizing approaches to planning educational programs, improving the efficiency of higher education institutions in Ukraine.*

Keywords: *educational offering, higher education institutions, admission, specialty, USEDE, correlation dependence, linear regression.*

UDC 519.22:504.06

Weigang Ganna

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor Department of Computer Science, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2082-2322>

E-mail: weigang.ganna@nubip.edu.ua

Myronchuk Kateryna

Senior lecturer Department of Computer systems, networks and cybersecurity, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6764-3746>

E-mail: k.komar@nubip.edu.ua

MODELING THE DYNAMICS OF TRAFFIC FLOWS BASED ON QUEUEING THEORY FOR INTEGRATION INTO INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS

Abstract *The article focuses on the study of traffic flow dynamics modeling in urban environments using queueing theory (QT). The research aims to develop a methodological approach to formalizing dynamic traffic flow processes, enabling their adaptation to modern intelligent transportation systems (ITS). Proposed mathematical models account for the stochastic nature of traffic flows and key performance indicators such as average waiting time, queue length, and throughput. Simulations of various transportation infrastructure scenarios integrating these models into ITS were conducted. The research findings confirm that applying QT under conditions of uneven traffic distribution significantly reduces delays, optimizes routing, and improves the efficiency of road infrastructure utilization. These results pave the way for further enhancements of urban transportation systems by integrating machine learning algorithms and big data analysis, allowing for consideration of the complex behavior of road users. The integration of QT models into ITS contributes to the improved efficiency of transport networks, fostering sustainable development of urban infrastructure. The proposed approaches are universal and can address pressing mobility challenges in contemporary urban agglomerations.*

Keywords: *Traffic flow modeling, queueing theory, intelligent transportation systems, traffic dynamics, traffic flow optimization, adaptive management, urban mobility, mathematical modeling, transportation infrastructure, congestion reduction.*

Introduction. With the growth of urbanization and the increasing number of vehicles in metropolitan areas, the challenges of traffic management are becoming increasingly relevant. Road congestion, traffic jams, prolonged delays, rising fuel consumption, and greenhouse gas emissions are among the primary issues faced by modern transportation systems. These challenges place significant pressure on transportation infrastructure, diminish residents' quality of life, and have adverse environmental impacts. In this context, the effective management of traffic flows has become one of the key objectives of transportation engineering.

Intelligent Transportation Systems (ITS) present new opportunities for addressing these challenges through the use of advanced technologies such as motion sensors, big data analytics, artificial intelligence, and real-time systems [1]. These technologies enable improved traffic flow management, enhanced infrastructure efficiency, optimized routing, and reduced delays. However, the complexity and variability of traffic dynamics necessitate the application of formalized mathematical models capable of accounting for various aspects of interaction between road users.

Queueing theory (QT) serves as a powerful tool for modeling transportation systems characterized by high levels of uncertainty and dynamism. Using mathematical methods, QT allows for the formalization of processes such as vehicle arrivals, service at intersections, signalized zones, or other traffic nodes [2]. It also facilitates the evaluation of key performance indicators, including average waiting time, queue lengths, and infrastructure resource utilization rates.

The advancement of queueing theory combined with ITS technologies supports the development of both microscopic and macroscopic traffic flow models [3]. These models provide deeper insights into the dynamics of movement, enable the optimization of transportation processes,

and ensure high service quality for all road users. In this context, research focused on integrating QT models into ITS is gaining importance, paving the way for the evolution of future transportation systems.

Literature Review. Modeling the dynamics of traffic flows is a vital research area in transportation engineering, lying at the intersection of applied mathematics, physics, and information technology. Queueing theory plays a central role in this field by providing a structured approach to analyzing and managing traffic flows, including their integration into ITS.

Microscopic modeling focuses on the behavior of individual vehicles within a traffic flow. For instance, the spring-mass system theory is used to create models that describe vehicle responses to disruptions in the flow. Yongfu Li et al. (2017) [4] demonstrated how stability analysis and perturbation methods can assess flow stability, identify conditions for its equilibrium, and develop adaptive traffic management systems. This approach not only highlights critical moments in the flow but also informs strategies for their optimization.

At the macroscopic level, research emphasizes analysis of aggregated traffic flow characteristics such as density, speed, and throughput. Jingyang Liao and colleagues (2023) [5] developed a macroscopic model incorporating multimodal interactions, such as those between private vehicles and shared mobility services. This model enhances the understanding of urban traffic system dynamics and supports efficient dispatching and resource management strategies. The integration of queueing theory models into ITS has significantly impacted congestion reduction, flow optimization, and the efficiency of transportation infrastructure. Hong Ying Jiao et al. (2015) [6] explored the use of cellular automata to analyze the effects of ITS on-traffic conditions. Such approaches optimize the operation of traffic signal systems and improve traffic flow coordination.

Meso-level modeling, which combines elements of microscopic and macroscopic analysis, has also gained attention. Meng Meng and colleagues (2014) [7] proposed a dynamic traffic distribution model considering various transport modes, including cars, buses, and bicycles. This approach efficiently evaluates demand-supply dynamics and supports ITS through shortest-path algorithms.

Fundamental flow models, such as the Lighthill-Whitham-Richards (LWR) model, remain essential tools for analyzing the relationships between density, speed, and flow. Pushkin Kachroo (2018) [8] extensively discussed the application of these models for predicting and managing traffic density. Extended frameworks that integrate continuum models with artificial neural networks offer new perspectives for real-time traffic flow forecasting. For example, Salissou Moutari and Stephen Robinson (2013) [9] proposed an integrated structure for simulating macroscopic flows, accounting for complex driver behaviors and spatiotemporal characteristics of traffic flows.

Despite significant advancements in traffic flow modeling, challenges remain due to the unpredictability of human behavior and external factors [10]. Addressing these limitations requires approaches that consider both the technical and social dimensions of traffic flow dynamics.

The literature review highlights substantial progress in the application of queueing theory for analyzing and optimizing transportation systems. Integrating these approaches into ITS enhances mobility, reduces congestion, and improves service quality in urban environments.

The aim of the article is to develop a methodological approach to modeling the dynamics of traffic flows based on QT and to integrate the resulting models into ITS. The study aims to evaluate the effectiveness of QT for modeling urban traffic flows, identify key parameters influencing network performance, and explore the potential of these models to enhance traffic management.

To achieve this objective, the following tasks were outlined:

1. **Formalizing Traffic Dynamics:** Developing QT-based models that account for the variability in vehicle arrivals and service processes at critical nodes.
2. **Efficiency Analysis:** Evaluating the effectiveness of the proposed models across various scenarios of transportation infrastructure, particularly under uneven flow distribution.
3. **Integration into ITS:** Incorporating mathematical models into ITS to optimize traffic signal operations, public transport routes, and reduce delays.
4. **Impact Assessment:** Assessing the effects of the implemented solutions on reducing congestion, increasing road capacity, and improving urban transportation system mobility.

The proposed approach addresses pressing issues in modern urban transportation networks, particularly by mitigating the adverse economic and environmental impacts of congestion and laying the foundation for the advancement of "smart" urban transportation systems.

Methodological Justification. The methodology of this article is grounded in the application of QT for modeling traffic flow dynamics in urban environments and its integration into ITS. This approach accounts for the complexity, uncertainty, and variability inherent in real-world traffic conditions, which are critical for ensuring the efficiency of transportation infrastructure [11].

To implement the integration of QT into traffic management effectively, key stages were identified. Each stage plays a crucial role in ensuring the accuracy of the models and the practical applicability of the results. These stages are summarized in Table 1.

Table 1 – Key Methodological Stages

№	Stage Name	Stage Description
1	Analysis and formalization of traffic flows	The initial stage involves analyzing the city's transportation infrastructure and identifying key nodes that create "bottlenecks" in the system. The modeling uses the mathematical framework of QT, which allows for the formalization of vehicle arrival processes and their servicing at intersections, traffic lights, or other nodes.
2	Selection and development of queuing models	Depending on the structure of the traffic flow, appropriate queuing models are selected (e.g., M/M/1, M/M/c, or their modifications). For each scenario, key parameters are determined: arrival intensity, average service time, throughput capacity, etc. The models are supplemented with stochastic components to account for the unevenness of the flows.
3	Modeling of traffic scenarios	To test the effectiveness of the proposed models, simulations of typical urban traffic scenarios are performed: intersections with traffic lights, roundabouts, highways with variable traffic intensity. The simulations allow for the evaluation of metrics such as waiting time, queue length, throughput capacity, etc.
4	Integration of models into ITS	To implement the models into real systems, modern ITS platforms are used, which include motion sensors, traffic light control systems, GPS trackers, and other digital technologies. This enables adaptive flow management in real-time.
5	Analysis and evaluation of efficiency	In the final stage, the effectiveness of existing and proposed approaches is compared using key indicators: reduction of delays, increased throughput, fuel consumption reduction, and emission reduction CO ₂ .

Based on the methodology outlined, the stages of analysis and modeling of traffic flows, presented in Table 1, provide a sequential and systematic approach to formalizing the dynamics of transport infrastructure [12, 13]. They cover all key aspects, from analyzing transport nodes to integrating models into real ITS. To illustrate the methodological approach and visualize the main stages of modeling, a conceptual diagram (Figure 1) was created, which demonstrates the interaction of key components. The diagram provides an overall view of the data collection process, mathematical modeling, adaptive management, and optimization of traffic flows, which is critical for ensuring the efficiency of urban transport systems. This connection between the theoretical foundations outlined in the table and their practical implementation, depicted in the diagram, emphasizes the importance of a comprehensive approach to solving problems related to reducing congestion, increasing mobility, and optimizing the use of transport infrastructure resources [14].

The methodological approach considers both theoretical aspects and practical requirements for modeling and managing traffic flows. Its application allows for obtaining well-founded results that can be used for decision-making in the planning of urban transport systems and the development of ITS.

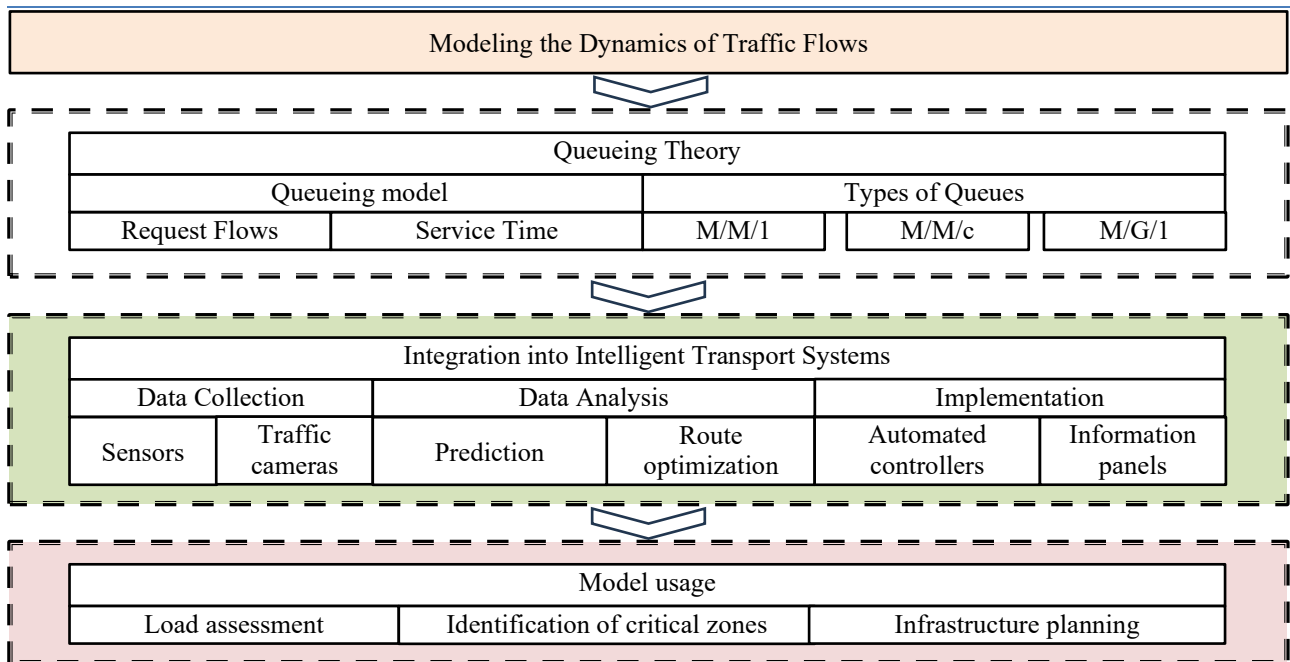


Figure 1 – Conceptual diagram of traffic flow modeling based on queueing theory

Results. Traffic flows are modeled as queuing systems, where vehicles act as transactions, and key nodes (intersections, traffic lights) serve as service channels. Vehicle arrival processes are modeled using stochastic distributions, such as the Poisson distribution, which describes the probability of a specific number of arrivals within a given time. The service time of vehicles at a node is typically modeled using the exponential distribution, allowing for variability in the duration of operations to be considered.

For example, in the classical M/M/1 model, the arrival flow of vehicles is described by a Poisson distribution with an average rate of λ , while the service time is characterized by an exponential distribution with an average rate of μ . In cases of intersections with multiple lanes or nodes with multiple service channels, the M/M/c model is used, where c — represents the number of service channels.

The formalization of traffic flow dynamics using QT provides a structured approach to describe the variability in vehicle arrivals and service times at infrastructure nodes. Vehicles are treated as transactions, while nodes act as service channels, with their interactions modeled through Poisson arrival distributions (λ) and exponential service time distributions (μ). Models such as M/M/1 and M/M/c capture the key parameters of traffic nodes, including the number of service channels and the variability of flows. QT enables the analysis of critical system parameters and facilitates adaptive management to improve the efficiency of transport infrastructure [15].

To ensure accurate modeling and adaptation to real-world conditions, parameters should be formalized into mathematical expressions that reflect the variability of flow intensity, service time, and system resource utilization efficiency.

Table 2 summarizes the key parameters used within the framework of queuing theory and their mathematical descriptions, which are fundamental for further development of traffic flow models and the analysis of their efficiency.

The parameters listed in Table 2 allow for the description of key characteristics of transportation flows and the evaluation of the efficiency of transportation nodes. Based on these parameters, various queuing models are developed, which are adapted to the specifics of particular scenarios in urban transportation infrastructure. Table 3 provides detailed mathematical descriptions of the M/M/1 and M/M/c models, which account for both single-channel and multi-channel service systems. These models enable the evaluation of delay probabilities, the average number of vehicles in the queue, waiting times, and other key efficiency indicators. This forms the foundation for further analysis of the operation of transportation nodes and the development of optimization strategies.

Table 2 – Key Parameters and Formulas

№	Parameter	Formula	Parameter description
1	Flow intensity	λ	the average number of vehicles arriving in the system per unit of time.
2	Service time	μ^{-1}	the average time required for a vehicle to pass through a node.
3	Load factor	$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$	where ρ characterizes the level of system load (when $\rho < 1$ the system operates in a stable mode).
4	Probability of delay	P_w	the probability that a vehicle will have to wait in the queue before being served.

Table 3 – Characteristics of the M/M/1 and M/M/c Models

№	Parameter	Mathematical description	
		Model for single channel system (M/M/1)	Model for a multi-channel system (M/M/c)
1	Probability of states	The probability of the system being in the state of requests (k), being served (P_k) $P_k = (1 - \rho) \cdot \rho^k,$ $k \geq 0,$	The probability that all channels (c) are used (P_0) $P_0 = \left[\sum_{n=0}^{c-1} \frac{(\lambda / \mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda / \mu)^c}{c!} \cdot \frac{1}{1 - \rho_c} \right]^{-1},$ where $\rho_c = \frac{\lambda}{c \cdot \mu}$. Probability of delay (P_w) $P_w = \frac{(\lambda / \mu)^c \cdot P_0}{c! \cdot (1 - \rho_c)}$
2	Average number of vehicles in the system (L)	$L = \frac{\rho}{1 - \rho}$	$L = L_q + \frac{\lambda}{\mu}$
3	Average number of vehicles in the queue (L_q)	$L_q = \rho^2 \cdot \frac{1}{1 - \rho}$	$L_q = \frac{P_w \cdot \rho_c}{(1 - \rho_c)}$
4	Average time a vehicle stays in the system (W)	$W = \frac{1}{\mu - \lambda}$	$W = W_q + \frac{1}{\mu}$
5	Average waiting time in queues (W_q)	$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$	$W_q = \frac{L_q}{\lambda}$
6	General model	$MM1 = \langle P_k, L, L_q, W, W_q \rangle$	$MMc = \langle P_0, P_w, L, L_q, W, W_q \rangle$

To model the dynamics of traffic flows, parameters that reflect time-varying intensity, such as during peak loads, are considered. Based on these models, simulations are conducted to estimate waiting times, queue lengths, and the throughput of infrastructure nodes, contributing to the optimization of system performance [16]. In real-world conditions, queuing models are supplemented with stochastic components to account for unpredictable factors such as weather or accidents, and they are also used for adaptive traffic signal control. The use of M/M/1 and M/M/c models demonstrates their effectiveness in managing traffic flows, especially under conditions of uneven distribution of flows in urban environments [17].

The single-channel M/M/1 model was used to simulate narrow intersections with low throughput capacity. Simulations showed that with high flow intensity (λ) the traffic load factor ($\rho = \lambda / \mu$) approaches 1, which leads to a significant increase in the average waiting time (W_q) and queue length (L_q). For systems with uneven flow (changing over time λ) the effectiveness of management significantly improved with the use of an adaptive approach [18]. Adjusting the

parameter μ (for example, by dynamically changing the green light duration at traffic lights) allowed the average waiting time to be reduced by 20%. For multi-lane intersections and transport interchanges, the M/M/c model was used. The results showed that increasing the number of channels (c) helps reduce the load ($\rho_c = \lambda / (c \cdot \mu)$) and significantly decreases the probability of delay (P_w) [12].

However, even with multiple service channels, the uneven distribution of traffic across lanes led to local overloading. This highlights the importance of adaptive management, which ensures the redistribution of flows and minimizes delays. To account for the unevenness of traffic flows, simulations were conducted with periodic fluctuations in arrival intensity (λ) over time. The models demonstrated that under significant fluctuations ($\lambda_{\min} \ll \lambda_{\max}$) the average waiting time and queue length could double. The use of adaptive management allowed for the minimization of these fluctuations, for example, by increasing the service capacity (μ) during peak periods. The integration of queuing theory models into ITS allows for the optimization of traffic flow management through adaptive traffic light control, public transport routing, and delay reduction [19]. Using QT in traffic light systems ensures dynamic signal timing adjustments based on real-time traffic conditions, contributing to more efficient flow distribution at intersections.

The integration of QT models into ITS allows for the optimization of traffic flow management through adaptive traffic light control, public transport routing, and delay reduction. Using QT in traffic light systems ensures dynamic signal timing adjustments based on real-time traffic conditions, contributing to more efficient flow distribution at intersections. Mathematical models based on queuing theory QT allow for the prediction of traffic flow intensity, assessment of load factors, and waiting times. Their integration into traffic light systems ensures adaptive signal timing, which helps reduce delays and queue lengths at intersections by 20–30%. The use of motion sensors and cameras allows for automatic adjustment of traffic light parameters in real time, even under conditions of uneven flow distribution or emergency situations. The integration of QT into ITS contributes significantly to enhancing the efficiency of transportation systems: reducing delays, shortening queue lengths, improving the regularity of movement, and minimizing the negative impact of traffic jams on the economy and the environment. This leads to increased mobility of the population and improved quality of transportation services [20].

The implementation of mathematical models from QT into ITS significantly improved traffic flow management. Thanks to the dynamic adjustment of traffic light signals using M/M/1 and M/M/c models, delays at intersections were reduced by 25-30%. Adaptive control algorithms, especially during peak hours, allowed for more even distribution of flows, reducing the average waiting time in queues. The use of multi-channel models M/M/c increased the efficiency of multi-lane traffic nodes, boosting intersection capacity by 20–40% and roundabouts by 35%. Adaptive flow regulation, considering the prioritization of the most congested directions, helped avoid local traffic jams and ensured the stable operation of infrastructure even in conditions of uneven flow distribution.

The integration of queueing theory models into public transportation allowed route optimization, reduced passenger waiting times, and improved the regularity of services. The use of GPS tracking and adaptive vehicle distribution reduced public transport downtime by 15%, positively impacting passenger travel speed in urban conditions [18-20].

The combination of implemented solutions contributed to the creation of a more efficient urban transportation infrastructure, reducing delays, lowering fuel consumption, and decreasing emissions CO₂. Further research should focus on the implementation of advanced technologies, such as machine learning, for even more precise management of traffic flows.

Conclusions. The results obtained highlight the importance of adaptive traffic flow management, which ensures the efficient use of infrastructure and minimizes congestion. The study confirmed the effectiveness of applying queuing theory to model the dynamics of traffic flows and their integration into ITS. The developed models allow for the optimization of traffic flow management, reducing delays at key junctions, and improving the capacity of urban transportation networks. Integrating these models into adaptive management systems, which use modern data collection and processing technologies, ensures flexible responses to changes in traffic conditions, enhancing mobility and infrastructure efficiency. At the same time, the results indicate the need to

account for the complex behavior of road users, social factors, and external conditions. The combination of mathematical approaches with modern technologies such as artificial intelligence and big data analysis presents a promising direction for further research. This will contribute to the creation of adaptive management systems that ensure sustainable development of urban transport networks and improve the quality of transport services.

References

1. Gogilidze, E., & Gogilidze, N. (2023). Intelligent transport systems: Challenges and achievements. *Georgian Scientists*. <https://doi.org/10.52340/gS.2023.05.04.34>.
2. Adolphs, M., Feistner, S., & Jahnke, V. (2024). Queueing theory. In *Springer Texts in Business and Economics*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47206-0_4.
3. Ross, S. M. (2024). *Introduction to probability models* (13th ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-44-318761-2.00013-0>.
4. Li, Y., Chen, W., Peeta, S., He, X., Zheng, T., & Feng, H. (2017). An extended microscopic traffic flow model based on the spring-mass system theory. *Modern Physics Letters B*, 31(09), 1750090. <https://doi.org/10.1142/S0217984917500907>.
5. Liao, J., Zheng, N., Cui, Z., & Shan, W. (2023). Aggregated modeling for multimodal traffic flow and dispatching control in urban road networks with ride-sharing services. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 149(8). <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.TEENG-7835>.
6. Jiao, H. Y., Liang, F. C., & Rao, Y. (2015). The traffic flow model of intelligent transportation system. *Applied Mechanics and Materials*, 713-715, 2000–2003. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.713-715.2000>.
7. Meng, M., Shao, C., Zeng, J., & Dong, C. (2014). A simulation-based dynamic traffic assignment model with combined modes. *Promet – Traffic & Transportation*, 26(1), 65–73. <https://doi.org/10.7307/ptt.v26i1.1252>.
8. Kachroo, P., & Ozbay, K. (2018). Traffic flow theory. In P. Kachroo & K. Ozbay (Eds.), *Feedback control theory for dynamic traffic assignment* (pp. 57–87). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69231-9_3.
9. Moutari, S., & Robinson, S. (2013). An integrated framework for macroscopic traffic flow simulation in road networks. *Modern Traffic and Transportation Engineering Research*, 2(3), 133–140.
10. Hao, Y., & Li, W. (2020). Deep learning for intelligent transportation systems: A survey of emerging trends. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(8), 3152–3168. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2929020>.
11. Md Golam Rabiul Alam, et. all. (2021). Queueing theory based vehicular traffic management system through Jackson network model and optimization. In *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3116503>.
12. Hadidi, T., Naghawi, H., Jadaan, K. (2022) “Unconventional Intersection Designs for Improving Traffic Operation Along Arterial Roads”, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 50(1), pp. 58–68. <https://doi.org/10.3311/PPtr.15732>.
13. Veres, M., Moussa, M. (2020). Deep learning for intelligent transportation systems: A survey of Emerging Trends. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(8), 3152–3168. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2929020>.
14. Filom, S. & Razavi, S. (2024). Advancing Travel Time Prediction in Intelligent Transportation Systems Through Learning-Based Uncertainty Quantification," *2024 IEEE International Conference on Smart Mobility (SM)*, 165-170. <https://doi.org/10.1109/SM63044.2024.10733522>
15. Koko, M. A., Burodo, M. S., & Suleiman, S. (2019). Queueing Theory and Its Application Analysis on Bus Services Using Single Server and Multiple Servers Model. *American Journal of Operations Management and Information Systems*, 3(4), 81-85. <https://doi.org/10.11648/j.ajomis.20180304.12>.

16. Chong, L., & Osorio, C. (2018). A simulation-based optimization algorithm for dynamic large-scale urban transportation problems. *Transportation Science*, 52(3), 637-656. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0717>.
17. Vandaele, N., Van Woensel, T., & Verbruggen, A. (2000). A queueing based traffic flow model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 5(2), 121-135. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(99\)00028-0](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(99)00028-0).
18. Rovetto, C., Cruz, E., Nuñez, I., Santana, K., Smolarz, A., Rangel, J. & Cano, E. (2023). Minimizing Intersection Waiting Time: Proposal of a Queue Network Model Using Kendall's Notation in Panama City. *Applied Sciences*, 13(18), 10030. <https://doi.org/10.3390/app131810030>.
19. Wang, P., & Zheng, L. (2022). A Queueing Model for Traffic Flow Control in the Road Intersection. *Mathematics*, 10(21), 3997. <https://doi.org/10.3390/math10213997>.
20. Tang, Y., Jiang, Y., Yang, H. & Nielsen, O.A. (2020). Modeling and optimizing a fare incentive strategy to manage queuing and crowding in mass transit systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, vol. 138(C), 247-267. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.05.006>.

Вайганг Ганна Олександрівна

*Кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук,
Національний університет біоресурсів та природокористування України*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2082-2322>

E-mail: weigang.ganna@nubip.edu.ua

Мирончук Катерина В'ячеславівна

*Старший викладач кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,
Національний університет біоресурсів та природокористування України,*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6764-3746>

E-mail: k.komar@nubip.edu.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДЛЯ ІНТЕГРАЦІЇ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ

Анотація. Стаття присвячена дослідженню моделювання динаміки транспортних потоків у міських умовах з використанням теорії масового обслуговування (ТМО). Метою дослідження є розробка методологічного підходу до формалізації динамічних процесів транспортних потоків, що дозволяє адаптувати їх до сучасних інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Запропоновано математичні моделі, які враховують стохастичну природу транспортних потоків і ключові показники ефективності, такі як середній час очікування, довжина черг та пропускна здатність. Проведено симуляцію різних сценаріїв транспортної інфраструктури з інтеграцією моделей у інтелектуальні транспортні системи (ІТС). Результати досліджень підтверджують, що застосування ТМО в умовах нерівномірного розподілу транспортних потоків дозволяє суттєво зменшити затримки, оптимізувати маршрути та підвищити ефективність використання дорожньої інфраструктури. Отримані результати відкривають перспективи для подальшого вдосконалення міських транспортних систем шляхом інтеграції алгоритмів машинного навчання та аналізу великих даних, що дозволяє враховувати складну поведінку учасників дорожнього руху. Впровадження моделей ТМО в ІТС сприяє підвищенню ефективності транспортних мереж, забезпечуючи стійкий розвиток міської інфраструктури. Запропоновані підходи є універсальними та можуть бути застосовані для вирішення актуальних проблем мобільності в умовах сучасних міських агломерацій.

Ключові слова: Моделювання транспортних потоків, теорія масового обслуговування, інтелектуальні транспортні системи, динаміка руху, оптимізація транспортних потоків, адаптивне управління, міська мобільність, математичне моделювання, транспортна інфраструктура, зниження заторів.

УДК 004.3

Смолій Вікторія Миколаївна*д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних систем та технологій,
Національний університет біоресурсів і природокористування України*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1268-7837>E-mail: vmsmolij@nubip.edu.ua**Шепелева Марина Євгеніївна***ФОП, Майстерня Арчі-дизайн, Київ, Україна*E-mail: archi.ukr@ukr.net**Смолій Натан Вікторович***здобувач спеціальності «Інформаційні системи та технології», Національний технічний
університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3763-6726>E-mail: hoibbitizukrainy@gmail.com**Шепелев Микита Сергійович***здобувач спеціальності «Інформаційні системи та технології»,**Національний університет біоресурсів і природокористування України*E-mail: ist23-m.shepeliev@nubip.edu.ua**ПРОЄКТУВАННЯ ПРИЛАДУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПАТРОНУ**

Анотація. Робота присвячена актуальній тематиці проєктування та виготовлення мобільних, портативних, ергономічних та точних приладів для вимірювання збурюючих сторонніх факторів (зокрема температури патрону), які беззаперечно і суттєво впливають на точність виконання військового завдання, а саме снайперської стрільби. Мета статті полягає в створенні приладу вимірювання температури патрону, який задовольняє певним схемотехнічним, конструкторським та технологічним параметрам, виготовлення прототипу виробу, апробація в умовах експлуатації та налагодження процесу збирання. В матеріалі статті досліджено вплив температури патрону на якісні характеристики процесу стрільби, зокрема при зміні температури заряду і повітря на однакову величину, було отримано висновок, що збільшення температури заряду патрона і повітря сприяють незначному збільшенню тривалості лету кулі та її кінцевої швидкості, але суттєвому збільшенню дальності її лету. Наведено геометричне оформлення пристрою, а саме було створено два варіанти конструктивного виконання портативного пристрою вимірювання температури патрону в залежності від використаного варіанту індикатора. Площа виробів різниться більше ніж у два рази, лінійні розміри становлять 103x55 ммxмм та 54x39 ммxмм при майже однаковій висоті готового виробу, що зумовлено використанням різних типів індикаторів і, відповідно, необхідності живлення різними номіналами напруги елементів живлення. Запропоновані прототипи приладу вимірювання температури патрону, які задовольняють певним схемотехнічним, конструкторським та технологічним параметрам, безпосередньо виготовлено дрібні партії виробів двох різновидів, передано на апробацію в умовах експлуатації та здійснено первинне налагодження процесу збирання. За результатами тестових випробовувань скореговано ланцюги постачання складових, конструкцію приладу і технології збирання. До перспектив подальших розвідок слід віднести необхідність більш детальної проробки питань оцінки попиту на готові виробу, динаміки номенклатури відкритого продажу складових, параметрів технологічного процесу збирання та з'ясування витрат на виробництво і ринкової вартості приладу, оскільки зазначена діяльність носить інноваційний, ініціативний та волонтерський характер.

Ключові слова: патрон, вимірювання температури, прилад, проєктування, індикатор, дешифратор, компоновка, геометричні розміри, пайка, збирання, виготовлення, тестування, виробництво

Актуальність. Оскільки в Україні іде повномасштабна війна і поступово налагоджується виробництво різних типів озброєнь, то проєктування, розробка, виготовлення, вдосконалення конструкцій і відналагодження виробництва зазначеного озброєння і супутніх приладів для нього, орієнтоване на антропометрію, ергономіку та потреби військових, є актуальною і дуже важливою задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Слід зауважити, що існує дуже велика кількість зовнішніх факторів (температура, швидкість і напрям вітру, рельєф місцевості, відстань, вологість, тощо), які істотно впливають на швидкість кулі, її траєкторію, влучність стрільби тощо, що зумовлює необхідність виконувати певні вимірювання перед початком виконання певної місії з використанням відповідного озброєння.

В роботі [1] досліджено вплив високої температури, високого тиску та сильної сили струму на незворотні та кумулятивні структурні пошкодження на поверхні внутрішнього каналу для пускової установки снаряду.

Здійснений термічний аналіз удару снаряда та досліджене подальше згорання для алюмінієвих снарядів з використанням високошвидкісної системи ударного запалювання в роботі [2] підтверджує актуальність проведення досліджень у обраному напрямку.

Для діапазону швидкостей снаряду проведено тестування запропонованих математичних моделей [3] в порівнянні з експериментальними вимірюваннями втрат енергії при прямих розрахунках гальмівної здатності при поєднанні реакцій однорідного електронного газу зі зв'язаними електронами.

Робота [4] присвячена випробуванням на гіпершвидкісний удар алюмінієвих снарядів, що врізаються в алюмінієві пластини. Досліджено спектри надшвидкісної хмари викиду, нерівномірність температури частинок хмари викиду та їх вплив на тенденцію зміщення в бік найвищої температури вибуху снаряду.

Досліджений математичний апарат роботи [5] призначений для з'ясування впливу збурюючих параметрів таких, як температура, тиск та наявність перевантажень на параметри снаряду під час пострілу.

В роботі [6] запропонована нова система вимірювання положення снаряда в системі швидкого вогню електромагнітного запуску, коли два снаряди розміщуються в електромагнітному пусковому каналі швидкого вогню, один в основному прискорювальному сегменті, а інший в сегменті попереднього заряджання. Основним є досягнення ключової позиції другим снарядом в основному сегменті прискорення при наявності заважаючих факторів.

Різноманіття методів досліджень кінетичних ударів для репрезентативних об'єктів у певних умовах наведено у роботі [7]. Особлива увага приділена дослідженням з мішенями від дециметрового до метрового розмірів в експериментах з ударами пороховою гарматою на швидкостях ~ 2 км/с, доповнених експериментами меншого масштабу з використанням вертикальної стрільби.

В роботі [8] визначено енергію асиметрії як найбільшого джерела невизначеності в рівнянні стану об'єкта.

Запропонований в [9] новий метод вимірювання траєкторії польоту снаряда спирається на одночасне порівняння швидкості та положення дослідного зразка за певною методикою. Точки перетину отримувались вимірюванням часу, коли снаряд проходив через кожен світловий екран.

Приведені в [10] дослідження аналізують вплив температури на рикошет кульових снарядів за допомогою експериментів і методу кінцевих елементів шляхом вимірювання напруги зсуву та кута внутрішнього тертя, коли температура снаряду підвищується.

Розрахунки кількості енергії в мішені, яка була розсіяна пластичною та/або в'язкопружною деформацією, приведені в [11]. Розглянуто взаємодію снаряда з матеріалом мішені, коли кінетична енергія снаряда переходить у пружну і пластичну деформацію, як самого снаряду, так і матеріалу мішені. За допомогою тепловізору та ІЧ-відеокамери отримано розподіл температури матеріалу мішені (як на торці, так і на задній поверхні).

Через лавиноподібну швидкість появи новітніх озброєнь різних стандартів та країн походження підналагодження та дослідження ефективних технологій застосування супровідного спорядження для стрільби (патронів) здійснюється оперативно на місцях і потребує мобільних, портативних, ергономічних та точних приладів для вимірювання

збурюючих сторонніх факторів, які безапелючно і суттєво впливають на точність виконання військового завдання.

Мета дослідження полягає в створенні приладу вимірювання температури патрону, який задовольняє певним схемотехнічним, конструкторським та технологічним параметрам, виготовлення прототипу виробу, апробація в умовах експлуатації та відналагодження процесу збирання.

Матеріали і методи дослідження. Серед усіх різновидів збурюючих впливів на точність виконання військової задачі слід виділити погодні умови, як найбільш істотну складову, і визначити найбільш істотний фактор впливу, спираючись на проведені дослідження існуючого стану питання.

Опір повітря рухові тіл (зовнішня балістика куль, мін і снарядів) описується силою лобового опору у вигляді [12]

$$R = \frac{\rho V^2 \pi d^2}{2 \cdot 4} i c_x \left(\frac{V}{V_S} \right), \quad (1)$$

де: R – сила лобового опору повітря; V – швидкість снаряда, ρ – густина повітря, V_S – швидкість звуку в повітрі; d – калібр снаряда, i – коефіцієнт форми снаряда, $c_x \left(\frac{V}{V_S} \right)$ – еталонна функція лобового опору.

Сила лобового опору повітря описується залежністю

$$F_\rho = \frac{1000kd^2}{g} \frac{2000-z}{2000+z} F_V, \quad (2)$$

де: k – значення форм-фактора; g – прискорення вільного падіння тіла; Z – вертикальна координата кулі в довільний момент часу, функція F_V має різні форми запису для надзвукової та дозвукової швидкості кулі.

У загальному випадку величина сили лобового опору повітря рухові кулі становить:

$$R(t) = c_x \rho_a S_x (V(t))^{2+\gamma_i} \left(\frac{V(t)}{V_S} \right)^{\beta_i}, \quad (3)$$

де c_x – коефіцієнт аеродинамічності форми кулі; ρ_a – густина повітря; S_x – максимальна площа поперечного перерізу кулі площиною, перпендикулярною до напрямку її швидкості; $V(t)$ – швидкість кулі в довільний момент часу; значення коефіцієнтів γ_i ($i = 1, 2$) і β_i ($i = 1, 2$) є різними при русі кулі з надзвуковою ($i = 1$) або дозвуковою ($i = 2$) швидкостями.

Залежність швидкості звуку від зміни температури повітря має наступний вигляд:

Сила лобового опору повітря описується залежністю

$$V_S = \sqrt{\frac{k_a R T_a}{\mu_a}}, \quad (4)$$

де $k_a = 1,4$ – показник адиабати для повітря; R – універсальна газова стала; T_a – абсолютна температура повітря; μ_a – умовна молярна маса повітря.

Враховуючи рівняння густини речовини та Клайперона-Менделєєва для газів, система диференціальних рівнянь для описання динаміки руху кулі в повітрі під дією її ваги набуде вигляду:

$$\{m\ddot{x} = \frac{c_x \rho_a S_x \dot{x}}{V_a^{\beta_j}} (\dot{x}^2 + \dot{z}^2)^{0,5(1+\gamma_i+\beta_i)} \quad m\ddot{z} = -mg \frac{c_x \rho_a S_x \dot{z}}{V_a^{\beta_j}} (\dot{x}^2 + \dot{z}^2)^{0,5(1+\gamma_i+\beta_i)}\}, \quad (5)$$

з врахуванням сили лобового опору повітря при розташуванні початку відліку системи координат Oxz в точці вильоту кулі. Вісь Ox лежить в горизонті зброї та скеровується в напрямку мішені, а вісь Oz – вертикально вгору від центру Землі.

Початкові умови для (5) мають вигляд

$$x(0) = 0, \dot{x}(0) = V_0 \cos \theta_0, z(0) = 0, \dot{z}(0) = V_0 \sin \theta_0, \quad (6)$$

де V_0 – початкова швидкість кулі; θ_0 – кут вистрілювання.

Кінематичні параметри руху кулі визначаються зміною температури повітря та безпосередньо етапом надзвукової і дозвукової швидкості кулі.

Зміна температури заряду патрона впливає на величину дульної швидкості кулі, яка змінюється в інтервалі $790 \text{ м/с} \leq V_0 \leq 850 \text{ м/с}$, що відповідає зміні температури заряду патрона в межах $-25 \text{ }^\circ\text{C} \leq t_{\text{зар}} \leq 35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Аналізуючи табульовані значення горизонтального зміщення кулі внаслідок зміни температури тільки заряду патрона або тільки повітря, зроблено узагальнення, що:

- величина температури заряду патрона, переважаючи, ніж температура повітря, впливає на кінематичні параметри руху кулі при стрільбі на віддаль до 600 метрів;
- при стрільбі на віддаль 700 – 900 метрів впливи температури заряду і повітря на рух кулі майже тотожні;
- при стрільбі на віддаль більшу 900 метрів переважаючим впливом на кінематику руху кулі стає температура повітря.

Досліджуючи зміщення точки обнуління траєкторії руху кулі при зміні температури заряду і повітря на однакову величину, було отримано висновок, що збільшення температури заряду патрона і повітря сприяють незначному збільшенню тривалості лету кулі та її кінцевої швидкості, але суттєвому збільшенню дальності її лету. Тобто оперативне дослідження (аналіз, вимірювання) температури патрону є актуальною і дуже важливою оперативною задачею, яка повинна вирішуватись дуже швидко з допомогою портативного приладу з енергонезалежним джерелом живлення, який повинен мати мінімально можливі розміри та максимально просте конструктивне виконання. Прилад може бути носимим на карабіні у будь-якому зручному місці амуніції, можливі варіанти безперебійного живлення, або отримання (з мінімальним часом інерційності включення) даних про температуру патрону при вмиканні за потреби. Виникають питання конструктивного оформлення, які визначаються використаними елементами індикації, обов'язково слід врахувати інтенсивність світловипромінювання (через вимоги безпеки), оскільки занадто яскраве (кольорове, інтенсивне, різнобарвне випромінювання) може мати демаскуючі властивості, бути небезпечним і призвести до негативних та трагічних наслідків.

Можливі варіанти, коли досягаються мінімальні масогабаритні показники виробу зазвичай супроводжуються необхідністю використовувати більш потужні джерела живлення, а більші за розмірами варіанти конструктивного виконання обумовлюють можливість використати джерела енергії меншої потужності. Вихід можливий дослідити обидвоє варіантів конструктивного виконання пристроїв вимірювання температури. Спроекувати, виготовити та протестувати готові різновиди виробів у реальних умовах. Спираючись на відгуки користувачів, розрахунки показників технологічності та аналіз економічних, антропометричних та надійнісних показників, можна оцінити кожен з виготовлених варіантів виробу, за потреби скорегувати варіант конструктивної реалізації, додати/прибрати функціонал або асортимент для подальшого виготовлення, або (за наявності безапелляційних переваг/недоліків) зупинитись на одному варіанті конструктивного виконання приладу.

Результати дослідження та їх обговорення. Реалізація приладів можлива на рідкокристалічних або світлодіодних семисегментних індикаторах з відповідною кількістю розрядів. Перевагами рідкокристалічних індикаторів в зазначених пристроях є робоча напруга у 3В (низьке енергоживлення), невеликий розмір елементу(ів) живлення та довготривалий термін експлуатації без обслуговування (заміни) складових. Блочний принцип конструювання обумовлений вимогами портативності створюваного приладу та організацією статичної системи управління рідкокристалічним семисегментним індикатором на певну кількість розрядів. Чотирьох, навіть трьох, знакових розрядів, буде достатньо для потрібної

індикації температури, де кожен сегмент має свій вихід. Кількість розрядів визначається наявною елементною базою, оскільки виробництво працює на покупних складових, які замовляються з інших країн, оскільки ажіотажний попит і обмежена пропозиція ринку не повинна зупиняти виробництво і зупиняти забезпечення потреб військових. Від схемотехнічних і конструктивних особливостей наявних до придбання індикаторів, обирається конструктивна реалізація приладу, зокрема розміри і варіанти конструкції пристрою. Процес збирання і технологічність забезпечуються суб'єктивним фактором, зокрема досвідом і наявними навичками працівників - збиральників. Слід зауважити та підкреслити, що складальні операції (відповідно техніко-технологічна реалізація приладу) повинні бути прості і зрозумілі навіть для нефакхівця, аби в будь-яких умовах забезпечити безперервний випуск готової продукції або збирання замовленої кількості одиниць виробу для передачі у певний підрозділ на певний момент часу. Використання TN позитивної матриці рідкокристалічних індикаторів з відповідною кількістю сегментів зі статичною схемою керування зумовлює геометричні параметри дисплею 50,8x30,5x2,8 ммхммхмм, що в свою чергу зумовлює значні у порівнянні із світлодіодними індикаторами розміри готового виробу, але 3В робоча напруга, що забезпечується одним елементом живлення довготривалої експлуатації дає безапелляційне право на життя робочої версії приладу. Трирозрядні семисегментні світлодіодні індикатори мають менші розміри для динамічної індикації за схемою із загальним анодом. У табл. 1 наведено електричні параметри зазначених індикаторів певного кольору з чорним фоном. Габарити корпусу становлять 30,1x16,0x7,0 ммхммхмм, що зумовлює менші розміри готового виробу, але потребує більш потужних елементів живлення.

Таблиця 1 – Абсолютні максимальні параметри семисегментних світлодіодних індикаторів при температурі $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$

ITEM	Amber	Super green	Super red	High red	Yellow green	Yellow	Blue	Pure green	White	UNIT
Power Dissipation (Pd)	52	50	40	36	44	42	66	66	66	mW
Peak Forward Current (Ifp)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	mA
Continuous Forward Current(If)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	mA
Reverse Voltage (Vr)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	V
Reverse Current(Ir)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	Ua
Operating Temperature Range(Ta)	-35~+85									°C
Storage Temperature Range(Tstg)	-35~+85									°C
Lead Solder Temperature	260°C for 3 sec									

Безапелляційним фактом є те, що основною функцією зазначеного приладу є індикація вимірної температури патрону. Основним конструктивним елементом, що відповідає за індикацію є семисегментний індикатор. Серед варіантів конструктивного виконання зазначеного приладу, слід особливу увагу звернути на трирозрядні індикатори, що обумовлено діапазоном вимірюваних температур. Також істотний вплив на конструктивне виконання приладу має варіант (різновид) використаних елементів випромінювання світла.

Слід виділити два різновиди елементів індикації, відповідно конструктивне виконання, конструкторська реалізація, будуть залежати саме від них. Рідкокристалічний семисегментний індикатор з напругою живлення 3 вольти, найбільш розповсюджений для використання у портативних приладах з малим енергоспоживанням (одного маловольтного елементу живлення вистачає на декілька років експлуатації приладу), тобто маємо дієздатний прилад в «гарячому» резерві. Є певні позитивні особливості використання приладу на відкритій місцевості та негативні – у темний час доби.

Слід зауважити, що невисока інтенсивність випромінювання і багаторічний термін використання одного елементу живлення перших різновидів приладів гарно відповідає концепції використання у різних зовнішніх умовах. Використання світлодіодного індикатора дозволяє отримати індикацію температури патрону у будь-який час доби у певному кольорі, але потрібне більш потужне джерело живлення. В той же час є особливості використання приладу на відкритій місцевості і в темний час доби через необхідність

Якщо використати в якості трирозрядного семисегментного індикатора світлодіоди, то маємо зазначені вище переваги, але напруга живлення становитиме 5В, тобто потрібне більш потужне (можливо більшого розміру та меншого терміну придатності). Зазначений факт зумовлює необхідність використання вмикача, що зумовить збереження ресурсу елементу живлення та забезпечить тривале використання в автономному режимі, що актуально при виконання військових специфічних і відповідальних завдань. В той же час загальна конструкція корпусу приладу буде потребувати додаткових працевитрат та обладнання через необхідність «тонкої» роботи щодо інтеграції перемикача на лицьову панель приладу.

Наведені робочі діапазони температур елементної бази дозволяють отримати адекватні дані щодо вимірюваної температури без будь-яких додаткових елементів обігріву/охолодження, що значно спрощує конструкцію і безпосередньо процес виготовлення. Схему включення одного світлодіода (сегмента) наведено на рис. 1.а.

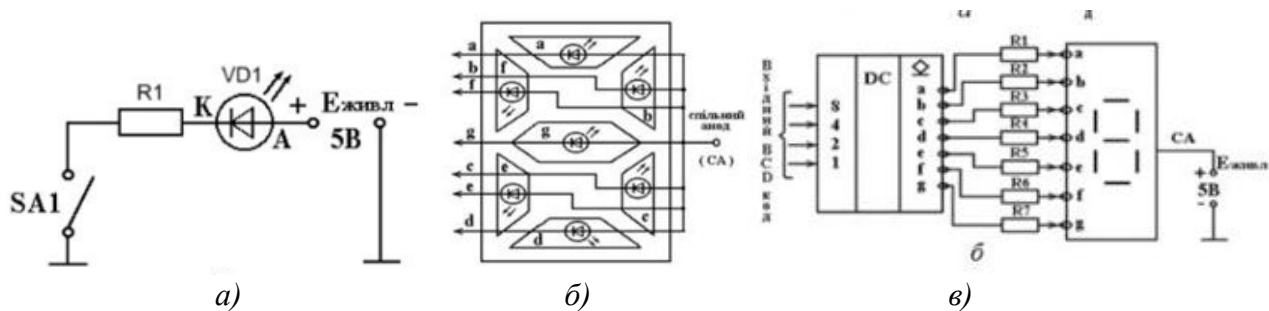


Рисунок 1 – Семисегментний індикатор на світлодіодах

Коли ключ SA1 замкнений, струм від джерела $E_{жив} = +5$ В проходить через світлодіод, викликаючи його випромінювання. Резистор, який включено послідовно, обмежує струм до рівня, що викликає запалювання світлодіода. Без резистора, що обмежує струм, світлодіод може вийти з ладу. На виводах світлодіодів під час випромінювання з'являється напруга: U_{VD} . пр, наприклад, (1,7...2) В. Як і будь-який діод, світлодіод чутливий до полярності прикладеної напруги. Щоб він був увімкнений у прямому напрямку, катод (К) повинен бути підключений до від'ємного полюса джерела живлення (землі), а анод (А) – до його додатного полюса.

Конструкцію семисегментного індикатора на світлодіодах наведено на рис. 1.б. Кожен сегмент (від а до g) має світлодіод та лінзу, що фокусує випромінювання. Аноди усіх світлодіодів з'єднано разом і підключено з правої сторони індикатора до одного виводу – спільного аноду (СА). Катоди кожного світлодіода пов'язано із зовнішніми виводами, позначеними а, b, с,... g. Індикатор (рис. 1.б) належить до семисегментних світлодіодних індикаторів із СА. Є індикатори зі спільним катодом, використання яких можливе і обумовлене наявністю у продажу (вільний доступ до придбання) у відповідних кількостях.

На рис. 1.6 показано керування сегментами індикатора за допомогою механічних перемикачів. Під час замикання одного з ключів SA1...SA7 струм від $E_{жив} = +5 В$ проходить: через обраний сегмент, обмежувальний резистор і замкнені контакти перемикача – на землю: ($-E_{жив}$). У цьому разі обраний сегмент буде світитися (випромінювати). Якщо, наприклад, ми бажаємо отримати на індикаторі десяткову цифру 7, то необхідно замкнути ключі SA1, SA2 і SA3, щоб випромінювали сегменти a , b і c . Якщо бажаємо отримати цифру 5, необхідно замкнути ключі SA1, SA3, SA4, SA6 і SA7, що заземлюють катоди сегментів a , c , d , f і g . Варто звернути увагу, що у світлодіодному індикаторі зі СА для активізації сегментів необхідно подати потенціал землі (логічний нуль).

Для керування роботою індикатора на рис. 1.6 використовуються керуючі сигнали, що формуються дешифратором BCD-коду у семисегментний код. зображення такого дешифратора на електричних схемах (рис. 2.а) і його підключення до семисегментного світлодіодного індикатора зі спільним анодом (рис. 2.б).

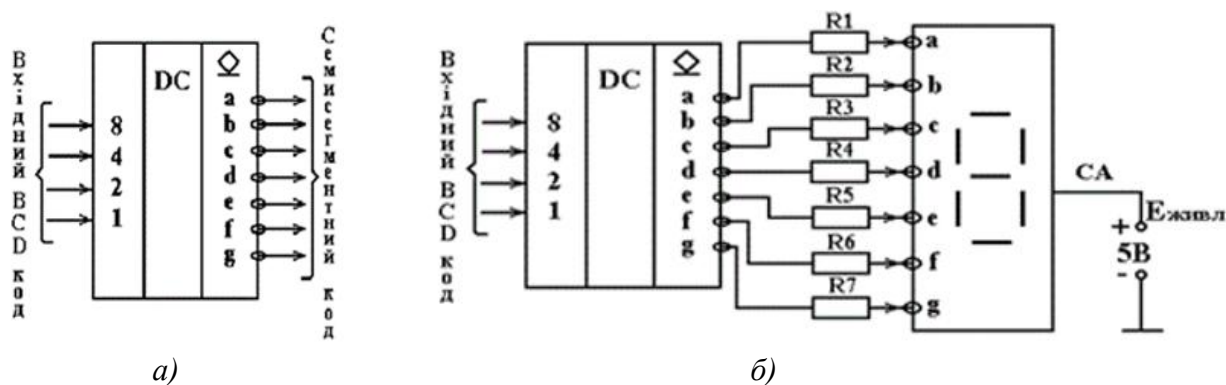


Рисунок 2 – Дешифратор BCD-коду у семисегментний код:
а – позначення; б – приклад підключення до індикатора

Як дешифратори BCD-коду у семисегментний можуть використовуватися різноманітні мікросхеми. Використана в даному пристрої, ІМС К514ИД2, позначення якої дано на рис. 2, а, має відкриті колекторні виходи і використовується разом з індикаторами, що мають спільний анод. У цьому разі потрібно застосування зовнішніх резисторів, що включаються між виходами дешифратора та входами індикатора (рис. 2.б). Припустимий струм мікросхеми дешифратора на кожному виході складає 22 мА.

Крім інформаційних входів, на які надходить двійково-десятковий код, дешифратори можуть містити низку керувальних входів, наприклад, для скасування нулів, гасіння, контролю випромінювання, синхронізації і т. ін.

Оскільки замовлення на виготовлення пристрою вимірювання температури надійшло для патронів калібру 338 Lapua Magnum, тому саме ці геометричні розміри були вирішальними при проектуванні двох варіантів конструктивного виконання зазначених пристроїв.

Наявність двох варіантів конструкції з двома різними типами індикації та відповідно номіналами і номенклатурою елементів живлення, дозволить забезпечити безперебійне постачання приладів, навіть при відсутності (дефіциті) складових-комплектуючих у продажі і можливості забезпечити ресурс часу при необхідності на затримання доставки замовлень з-за кордону, необхідності адаптації нової елементної бази під зазначену конструкцію приладу, чи повну переробку і створення нового варіанту конструктивного виконання зазначеного пристрою без втрати можливості відвантажувати нові створені вироби на фронт, доки ідуть виробничі переоснащення, доробки, перемовини з постачальниками, тощо.

Було створено два варіанти конструктивного виконання портативного пристрою вимірювання температури патрону (рис. 3) в залежності від використаного варіанту індикатора. Площа виробів різниться більше ніж у два рази, лінійні розміри становлять 103x55 ммxмм (рис. 3.а), та 54x39 ммxмм (рис. 3.б) при майже однаковій висоті готового виробу, що

зумовлено використанням різних типів індикаторів і, відповідно, необхідності живлення різними номіналами напруги елементів живлення.

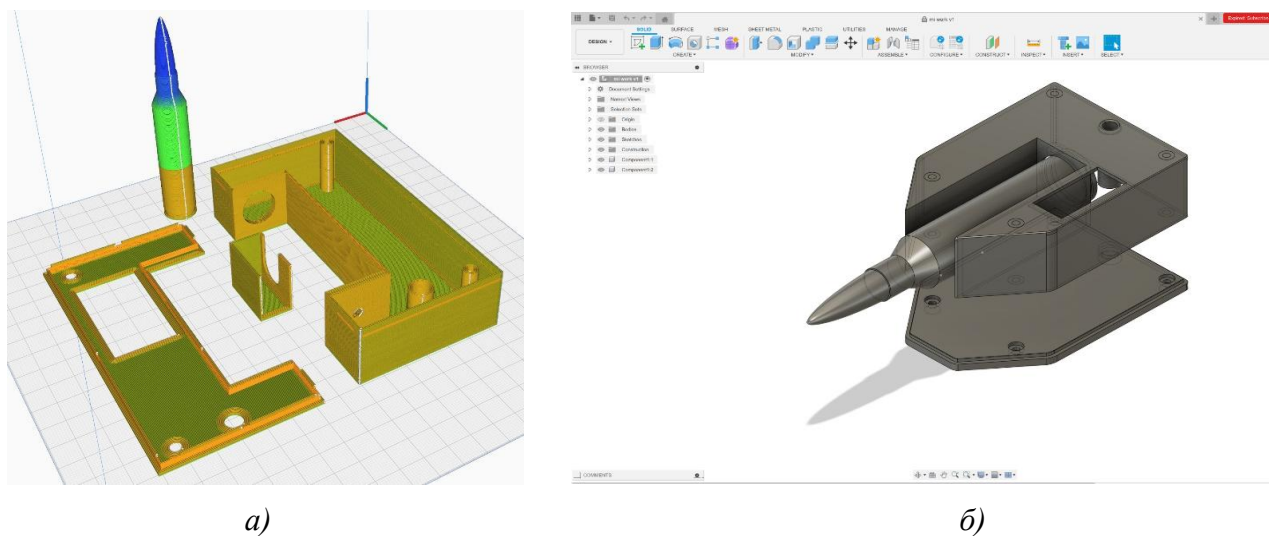


Рисунок 3 – Конструктивне виконання портативного пристрою вимірювання температури патрону

Проектування приладу вимірювання температури патрону було зведено до задачі геометричної компоновки певної кількості складових елементів у загальному об'ємі за умови задовільнення певного переліку додаткових вимог. Ця задача формалізована і узагальнена компоновочним параметром та має вигляд:

$$W_k = F(G, V, C, \dots), \quad (7)$$

де G, V, C, \dots – складові загального компоновочного параметру (маса, об'єм, енергоспоживання, тощо).

У даному проєкті потрібні параметри були представлені у вигляді:

$$\{W_G = F_G + F(G), W_V = F_V + F(V), W_C = F_C + F(C), \dots\}, \quad (8)$$

де F_G, F_V, F_C, \dots – величини, що визначають виконання технічних вимог на конструювання, але не залежать від зміни складових компоновочних параметрів. До таких величин були віднесені елементи кріплення, електричного з'єднання (роз'єми, клеми, тощо) – захист від кліматичних, механічних впливів і т.ін.; $F(G), F(V), F(C), \dots$ – величини, що визначають виконання технічних вимог до конструкції і залежать від зміни складових компоновочних параметрів.

Знаходження оптимуму узагальненого компоновочного параметру звелось до вирішення системи рівнянь

$$\frac{\partial F(G)}{\partial G} = 0, \quad \frac{\partial F(V)}{\partial V} = 0, \quad \frac{\partial F(C)}{\partial C} = 0, \dots \quad (9)$$

Було використано індикатор з інтегрованим перетворювачем (дешифратор сигналів), який під'єднується до датчику термопары і джерела живлення. Готовий виріб та процес виробництва наведено на рис. 4.

При об'ємному монтажі виробів використовувались клемники, об'ємні проводи, комутатор 2x2 та здійснювалось ручне розпаювання контактів (рис. 4.а). Продуктивність процесу збирання залежить від вправності, досвідченості та обізнаності задіяних в процесі збирання робітників, та зумовлює дуже великий вплив суб'єктивного чинника на якість і продуктивність технологічного процесу виготовлення пристроїв.

Паралельно здійснюється виготовлення двох варіантів конструктивного оформлення пристроїв (рис. 4.б) через наявність наявних запасів індикаторів двох типів. Поступове

накопичення певної кількості комплектуючих на складі дозволяє забезпечити живучість, ритмічність та безперервність серійного випробовування. Надійність, правильність і точність вимірювань для готового приладу певного конструктивного виконання оцінюється в процесі виробництва (вихідний контроль), що проілюстровано на рис. 4.в.

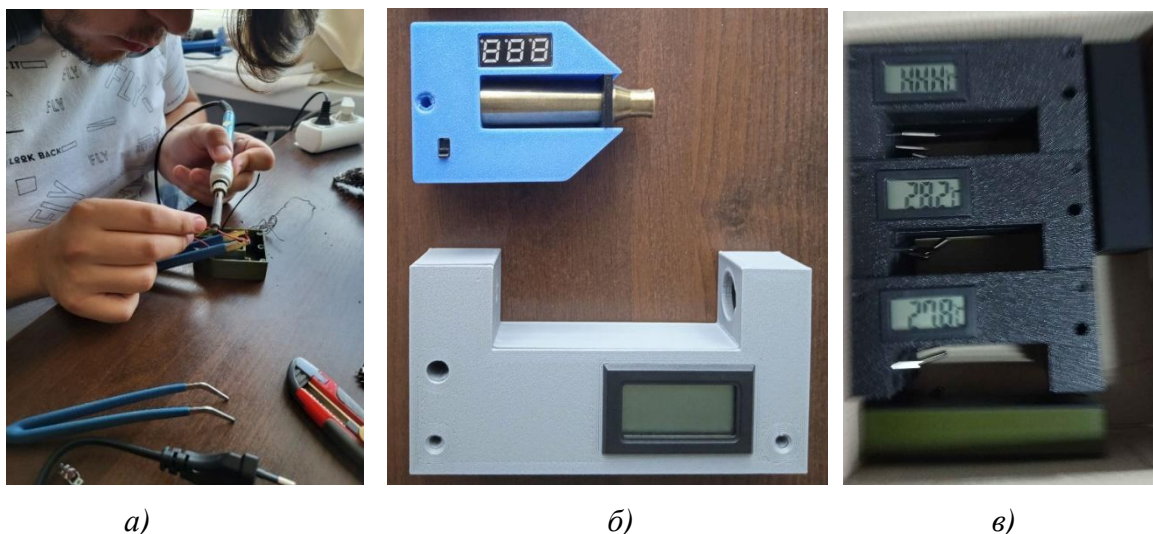


Рисунок 4 – Прилад вимірювання температури патрону

Абсолютну і відносну похибку вимірювань для кожного приладу оцінює безпосередньо замовник в кожному конкретному випадку при здійсненні підготовчого етапу введення приладу в експлуатацію. Точність, похибка, відтворюваність – основні параметри зазначених приладів, які характеризують придатність, доцільність і раціональність використання приладів, що зумовлено дуже високою вартістю помилки у вимірюванні температури патрону через загрозу людському життю.

Станом на поточний момент здійснюється ручне збирання невеликих партій приладів з оперативною відправкою у зону бойових дій, що зумовлено повномасштабною війною в країні. Відзиви від використання та пропозиції щодо вдосконалення конструкції надходять регулярно і тим самим відбувається апробація та вдосконалення конструкції виробу, обсяг замовлень зумовлює оптимізацію ланцюга постачання і технології збирання.

Параметри оптимізації виробництва, зокрема, забезпечення технологічності і ритмічності збирання виробів обмежуються фактором наявності замовлень на іншу номенклатуру виробів, потрібних на фронті, зокрема БПЛА та їх складових. Підналагодження процесу виробництва досліджених приладів вимірювання температури патрону під масове серійне виробництво здійснюється безповоротно, але в умовах кадрового, матеріально-технічного та фінансового дефіциту, тому стикається з певними труднощами та повільним темпом, але ретельне вивчення зазначених потреб, набутий досвід і зворотній зв'язок від використання, що супроводжується наявністю елементної бази та конструктивним і проектним оформленням приладу, дозволяють системно та продуктивно виготовляти зазначені прилади, поступово виходячи на потрібний обсяг виробництва.

Висновки і перспективи. Теоретично досліджено вплив температури патрону на якісні характеристики процесу стрільби, зокрема при зміні температури заряду і повітря на однакову величину, було отримано висновок, що збільшення температури заряду патрона і повітря сприяють незначному збільшенню тривалості лету кулі та її кінцевої швидкості, але суттєвому збільшенню дальності її лету.

Запропоновано геометричне оформлення пристрою, а саме було створено два варіанти конструктивного виконання портативного пристрою вимірювання температури патрону в залежності від використаного варіанту індикатора. Площа виробів різниться більше ніж у два рази, лінійні розміри становлять 103x55 ммхмм та 54x39 ммхмм при майже однаковій висоті

готового виробу, що зумовлено використанням різних типів індикаторів і, відповідно, необхідності живлення різними номіналами напруги елементів живлення.

Проаналізовано елементну базу та виконано проектування прототипів приладу вимірювання температури патрону, який задовольняє певним схемотехнічним, конструкторським та технологічним параметрам, безпосередньо виготовлено дрібні партії виробів двох різновидів, передано на апробацію в умовах експлуатації та здійснено первинне відналагодження процесу збирання. За результатами тестових випробовувань скореговано ланцюги постачання складових, конструкцію приладу і технології збирання.

Перспективами подальших розвідок є оцінка попиту на готові вироби, динаміка номенклатури відкритого продажу складових, оцінка параметрів технологічного процесу збирання та з'ясування витрат на виробництво і ринкової вартості приладу, оскільки зазначена діяльність носить інноваційний, ініціативний та волонтерський характер.

Список використаних джерел

1. Jiawu, L., Ronggang, C., Anqi, Z., Yuxi, C., & Yu, Z. (2024). An inner surface image acquisition and fusion method of narrow and long atypical cavity based on multi-camera parallel moving image acquisition. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 1161, 306–318. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0869-7_34.
2. Woodruff, C., Dean, S. W., Cagle, C., Croessmann, C. L., & Pantoya, M. L. (2022). Comparing pyrometry and thermography in ballistic impact experiments. *Measurement*, 189, Article 110488. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110488>.
3. White, A. J. (2022). Mixed stochastic-deterministic time-dependent density functional theory: Application to stopping power of warm dense carbon. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 34(17), Article 174001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ac4f1a>.
4. Ma, Z.-X., Huang, J., Shi, A.-H., Hu, H.-Y., Li, Y., & Liu, S. (2015). The analysis technique for ejecta cloud temperature based on atomic spectrum. *Procedia Engineering*, 103, 357–364. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.04.033>.
5. Gao, L., Di, C., Kong, D., & Liu, X. (2012). Design and simulation of missile-borne measuring device shell. *Applied Mechanics and Materials*, 152–154, 1258–1261. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.152-154.1258>.
6. Xu, W., Yuan, W., Xu, R., Zhao, H., Cheng, W., Zhang, D., Zhao, Y., & Yan, P. (2017). Non-contact and contact measurement system for detecting projectile position in electromagnetic launch bore. *Measurement Science and Technology*, 28(12), Article 125902. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa9442>.
7. Durda, D. D., Walker, J. D., Chocron, S., Housen, K. R., Grosch, D. J., Marchi, S., Flynn, G. J., & Strait, M. M. (2019). Laboratory impact experiments with decimeter-to meter-scale targets to measure momentum enhancement. *Planetary and Space Science*, 178, Article 104694. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.07.008>.
8. McIntosh, A. B., Hagel, K., McIntosh, L. A., & Yennello, S. J. (2022). Temperatures of compound nuclei produced in complete and incomplete fusion and the role of neutron excess. *Il Nuovo Cimento C*, 45(3), Article 47. <https://doi.org/10.1393/ncc/i2022-22047-2>.
9. Yu, J., Li, Y., & Wang, X. (2009). Theory of ballistic trajectory measurement using a multireflective laser light screen target. *Proceedings of SPIE*, 7382, Article 73823E. <https://doi.org/10.1117/12.834303>.
10. Kim, Y. K., & Choi, W. C. (2018). Ricochet of spheres on sand of various temperature. *Defence Science Journal*, 68(2), 150–158. <https://doi.org/10.14429/dsj.68.11846>.
11. Carton, E. P., & Roebroeks, G. H. J. J. (2013). Thermal imaging during ballistic testing of armour materials. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Ballistics (Vol. 2, pp. 1079–1089)*.
12. Ministry of Defence of Ukraine. (2006). *Nastanova zi strilets'koyi spravy 7,62-mm snaypers'ka hvyntivka Drahunova (S·HD) [Manual on shooting for the 7.62-mm Dragunov sniper rifle (SVD)]*. Kyiv.

Smolij Viktorija

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Information Systems and Technologies, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1268-7837>

E-mail: vmsmolij@nubip.edu.ua

Shepeleva Maryna

FOP, Archi-design Workshop, Kyiv, Ukraine

E-mail: archi.ukr@ukr.net

Smolij Natan

Postgraduate Student of the specialty "Information Systems and Technologies", National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3763-6726>

E-mail: hoibbitizukrainy@gmail.com

Shepelev Nikita

Student of the specialty "Information Systems and Technologies", National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

E-mail: ist23-m.shepeliev@nubip.edu.ua

DESIGN OF A CARTRIDGE TEMPERATURE MEASURING DEVICE

Abstract. *The work is devoted to the current topic of designing and manufacturing mobile, portable, ergonomic and accurate devices for measuring disturbing extraneous factors (in particular, the temperature of the cartridge), which undoubtedly and significantly affect the accuracy of the performance of a military task, namely sniper shooting. The purpose of the article is to create a cartridge temperature measuring device that meets certain schematic, design and technological parameters, manufacture a product prototype, test it in operating conditions and debug the assembly process. In the material of the article, the effect of cartridge temperature on the qualitative characteristics of the shooting process was investigated, in particular, when the temperature of the charge and air changed by the same amount, it was concluded that an increase in the temperature of the charge of the cartridge and air contribute to a slight increase in the duration of the bullet's flight and its final speed, but a significant increase in range her flight. The geometric design of the device is presented, namely, two variants of the design of a portable cartridge temperature measuring device were created depending on the indicator variant used. The area of the products differs by more than two times, the linear dimensions are 103x55 mm x mm and 54x39 mm x mm with almost the same height of the finished product, which is due to the use of different types of indicators and, accordingly, the need to be powered by different voltage ratings of power cells. Proposed prototypes of the device for measuring the temperature of the cartridge, which satisfy certain schematic, design and technological parameters, small batches of products of two varieties were directly manufactured, submitted for approval under operating conditions, and initial debugging of the assembly process was carried out. Based on the results of the tests, the supply chains of the components, the design of the device and the assembly technology were adjusted. Prospects for further research should include the need for more detailed study of the issues of assessing the demand for finished products, the dynamics of the nomenclature of the open sale of components, the parameters of the technological process of assembly and finding out the costs of production and the market value of the device, since the specified activity is innovative, proactive and volunteer in nature.*

Keywords: *cartridge, temperature measurement, device, design, indicator, decoder, layout, geometric dimensions, soldering, assembly, manufacturing, testing, production*

UDC 004.35:004.5

Nazarenko Volodymyr

Ph.D., Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7433-2484>E-mail: volodnz@nubip.edu.ua**Ostroushko Bogdan**

M.S., assistant Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0849-8990>E-mail: b.ostroushko@nubip.edu.ua**ENHANCING HUMAN-COMPUTER INTERACTION: THE ROLE OF INTELLIGENT USER INTERFACES IN EMBEDDED AND IOT SYSTEMS**

Abstract. *The rapid evolution of innovative technologies has significantly transformed digital applications and human activities. Advances in hardware, digital software, and interactive user interfaces have made user experience (UX) design a critical factor in various industries, including healthcare, aerospace, construction, and military sectors. Human-Computer Interaction (HCI) is vital in enhancing system usability by ensuring intelligent interaction systems are user-centric and accessible. Integrating intelligent systems, the Internet of Things (IoT), and embedded technologies presents new challenges and opportunities in interface design. Additionally, as industries adopt intelligent automation and digital transformation strategies, the demand for adaptive, user-friendly interfaces grows. Understanding how users interact with these technologies is essential to optimizing efficiency and improving overall user satisfaction. This study explores the principles of HCI and interaction design, analyzing how digital and analog interfaces contribute to practical system usability. A qualitative approach was adopted, reviewing contemporary research on user interface (UI) design, interactive systems, and intelligent applications. The study also considers case studies from various industries where UX and interface optimization have significantly impacted system performance and user satisfaction. Data collection included literature analysis, expert interviews, and usability testing reports, ensuring a comprehensive understanding of the challenges and advancements in interaction design. The research methodology also incorporates a comparative analysis of traditional and emerging interface models to identify best practices in designing adaptive and intelligent systems. Findings indicate that well-designed interfaces enhance user engagement, efficiency, and system functionality. Factors influencing usability include adaptive design, accessibility considerations, and intuitive user experiences. Case studies reveal that industries incorporating advanced UX principles and innovative interaction technologies demonstrate improved operational efficiency and user satisfaction. Moreover, findings suggest that integrating AI-driven assistance, real-time feedback mechanisms, and multimodal interaction significantly improves user adaptability and system effectiveness. The study also highlights the importance of cognitive load reduction in interface design, emphasizing strategies such as predictive analytics and context-aware computing to enhance user interactions. The study highlights the Importance of HCI in designing user-friendly and efficient systems. It emphasizes the need for continuous innovation in UX and interface design, particularly in emerging fields such as IoT and embedded systems. The discussion underscores the role of AI, machine learning, and augmented reality in shaping the future of user interactions. Future research should focus on further integrating AI-driven personalization and adaptive interfaces to improve user experience. The findings suggest that interdisciplinary collaboration between engineers, designers, and cognitive scientists is essential to developing more effective and human-centered interaction systems. Addressing ethical considerations, such as data privacy and accessibility, will ensure equitable and inclusive design in future technological advancements.*

Keywords: *user interface design, user experience, smart systems, system interaction, computer engineering.*

Introduction. Innovative technologies have changed software and digital applications, rapidly transforming most modern human activities. The state-of-the-art advancements in hardware, contemporary material and production, digital software technologies, interactive digital devices, and user interfaces have become integral to the user experience interaction design. The areas of interaction design encompass most of the general user and professional applications across industries, such as construction, aerospace, healthcare, and military industries. Intelligent interaction systems are user-centric. They enable applications (systems) interfaces to be usable by humans in the case of either digital or analog systems, mechanical and purely virtual interaction devices.

Human-Computer Interaction (HCI) studies how to improve integration systems and their interfaces. Besides, it is an area of active research for the new methodologies to refine or redesign existing interaction processes and their underlying mechanics for enhanced user-system interaction experiences. Another significant benefit of the HCI field is task optimization and user-machine interaction efficiency. User-system interaction, in most cases, is a cyclical process that can be characterized as a series of continuous or step actions followed by feedback from the system. The iterative design pattern is not limited to input-output cycles; it influences the software, hardware, system design, and development processes.

Human-computer interaction systems are part of the extended software and hardware systems architecture process. However, it is a complex process that can and should be conducted separately before and during the system development pipeline. Interaction and feedback loops are central to user task processing and digital engineering system design management. A vital system designer's task is to align system functionalities with user requirements and projected content of use. The feedback loop is a standalone component vital to improving user workflows. Feedback systems can serve as a supporting pillar to teach users about the systems' nature, capabilities, limitations, and affordances, all of which ensure the long-term adaptability of interactive systems.

The importance of well-designed interaction and feedback loops in large interaction processing systems has been widely acknowledged. By utilizing these loops, the system designer can provide a user with an understandable interface, which in turn makes the whole system give a real-time response based on user input, which enables the user to make rational in-time decisions for a single task or help guide and support user support in case of numerous system states iterations. Interaction and feedback are parts of a larger complex system design engineering tasks. Such systems support input and output mechanisms, such as visual, auditory, haptic, and mixed-reality feedback mechanisms. Another task of the feedback subsystem is to offer users insights into system behaviors, prevent some (at least the most critical) errors, and teach the users to refine their system knowledge and make tasks faster and more seamless. The iterative interaction process as a whole promotes system usage efficiency. It reduces the cognitive load on user innovation, ensuring that digital interfaces and the system UI components are designed with the end-user in mind. Potential interactions are well aligned with their intended applications.

Purpose. This research aims to provide the current state of human-computer interaction research, focusing on interaction and feedback loops, breaking it into functional components, and presenting a robust model for interaction design context, interaction process, and the view on User Interaction – Feedback Systems and States.

Literature review. Undoubtedly, HCI and user interface design are prominent and novel areas for research. Many scientists and engineers are actively engaged in human-computer interaction research. The area of their research work ranges widely across industries and fields, including various areas such as 3D interaction, the Internet of Things, voice interface, ML, AI in interface design, mixed reality, and intelligent systems.

Borchers (2000) highlighted a novel at the time, a pattern-based approach to design interaction systems; he focused on methodologies that could improve interface (systems) usability in complex use-case environments such as music and education [1]. More modern but similar studies conducted by Löwgren in 2013 showed an in-depth breakdown of human-computer interaction issues, focusing on the interdisciplinary nature of the systems design process [2]. The author noted the role of interaction design methodology in shaping the user's experience to make it seemingly intuitive. Both works are fundamental, highlighting the critical role of interactive design as a novel methodology. Interaction design can be considered not only as a technical but also as a creative component in the field of HCI, introducing the balance between technical and user-centered perspectives.

The integration of the latest technologies, such as 3D interfaces, virtual reality, voice interfaces, big data, and wireless communications, to name a few, has led to the expansion of modern interaction design and its applications. One of the earliest researchers in this area, Bowman, introduced in 2001 the principles of designing a 3D user interface for enchanting virtual environments and providing more interaction options through 3D graphics [3]. Expanding on Bowman's work, LaViola 2008

showed the accessibility of spatial 3D interaction using video games as a medium, reducing the gap between digital interfaces' technological implementation complexity and making complex user interfaces available to an enormous scope of designers and users [4]. As a continuation of previous advancements in material science and computer systems technologies, Zhu worked on solving the interoperability issues between IoT and HCI [5]. In his work, he presented the 3D-printed triboelectric sensor, which had been printed for this task for gait analysis and virtual inspection. As a result, this enabled the interaction systems to combine a data-centered architecture with the intended functionality of the user interface system. All the research works above highlighted the impact and importance of 3D graphics and IoT technologies in HCI research and interaction systems design [6, 7].

Feedback and interaction loops have also been studied from the perspective of system tasks and resource optimization. Fischer (2022), in his research work, used the optimal feedback control method to simulate user-system interaction dynamics, while Ritter (2011) investigated the cognitive benefits of subliminal feedback loops for reducing the user's mental load [8, 9]. Machine learning advances have greatly benefited feedback loop design and conceptual interface user testing. Honeycutt, in 2020, examined the implementation of machine learning algorithms using human-in-loop feedback mechanisms and identified interaction process problems [10]. Among the errors and issues found, balancing system usability with user experience in the context of seemingly natural interaction processes was the most critical. At the same time, Palanque (2020) classified interaction faults in system feedback loops, highlighting the impact of software system (application) reliability on safety issues [11]. These works highlight the critical role of feedback in improving user experience, maintaining system reliability, and increasing trust.

Interdisciplinary approaches provide a great field of potential topics that can be used to solve existing HCI issues and look for novel, groundbreaking approaches [12]. Psychology, sociology, and neural sciences are interviewed in a close context with user experience design [13, 14]. Costabile (2007) presented a new methodology that classified visual interactive systems design models that combined user-application requirements with software system design [15]. Ju and Leifer (2008) advocated for a more intuitive interaction design that considers the user interaction loop approach to help minimize user-application interaction frustration [16]. Hollender (2010) combined cognitive load theory with HCI concepts to improve educational applications [17]. A new paper by Ramirez (2024) on advances in natural language processing further illustrates how AI-driven technologies can transform interaction paradigms [18]. Most scientific works emphasize the requirements for new interaction systems to be more intelligent and user-driven and consider human behavior's cognitive and mental aspects. Such studies by many authors illustrate a diverse approach to HCI research, embracing new methodologies, technologies, and interdisciplinary connections. The research synthesis provides the basis for the design of advanced, user-friendly interaction systems in an increasingly complex digital age.

Methods. A comprehensive overview of the primary data, components, and systems used in human-computer interaction (HCI) research is summarized in Table 1. HCI is facilitated through diverse mechanical, visual, and auditory devices. Major interaction systems comprise digital, electronic, and electrical components for input and output operations and data and signal processing modules. Each interaction type corresponds to a specific sample system, such as LCDs, touchscreen interfaces, audio speakers, and spatial sensors.

User, software, and hardware systems design incorporates data and programming functions. Interaction data types are categorized based on their interaction mode. Additionally, the most common user-interface interaction functions, derived from Table 1, are outlined, highlighting their ability to accept input data and provide result outputs. A brief classification of human-computer interaction underlying systems:

- Direct input (output) – screen, mechanical keyboard, sound, and voice recording devices;
- Context-aware systems – scanner device, spatial sensor, digital camera, mixed reality devices;

- Smart data-driven system – semi-automated, autonomous decision support system, predictive behavior, and state systems.

*Table 1– Human-computer interaction data, systems, and components**

HCI system	Components	Data
Manual mechanical	Device, Sensor, Signal processing	Analog Signal, Device data, spatial data
Hardware	Smart Sensors Monitoring and recording devices Embedded systems Industrial devices	Signals Numerical Logs Commands/Tasks
Communications and Data	Wired/Wireless Smart Grid Gateway Data and Protocols	IP addresses Data packets Segments Connection Status Message
Analog bw screen	physical input, output	Screen size, text, language
Sound	audio processor, speaker, recorder	wave data, timing, compression algo.
Visual digital screen	GPU, screen, renderer	geometry data, screen data, FX, 3D coordinates
Smart	computational unit, intelligent system	parameters, state, visualization

* prepared based on the author's work and public research data

Researchers and industry professionals use various tools to develop novel interaction systems. The most frequently employed hardware and software solutions range from - mixed reality glasses, sensor screens, mobile phones, tablet devices, mechanical interaction devices (joystick, gamepad, mouse, and keyboard), misc. Sensors and trackers devices for detection and recognition tasks, spatial motion controllers, and other digital or analog devices.

HCI and interaction design methodologies are grounded in structured workflows. The product or application design process begins with business and product planning, proceeds through design and technology development, and culminates in user-facing outputs. These outputs consist of structured visual and textual elements accessible through menus and navigation panels.

HCI involves a three-phase process, as illustrated in Figure 1. The initial phase begins with a user-defined goal, representing the objective achieved through interactive devices, including digital, analog, mechanical, or miscellaneous types. User input is processed by a software system (e.g., a computer or microcomputer) based on the interaction medium and input type. The underlying components, actions, and conceptual functions associated with each interaction phase are summarized in the lower section of Figure 1, categorized by their respective interaction phases.

Figure 2 provides a comprehensive framework for understanding an IoT ecosystem's key components and interconnections. It outlines the layered structure of IoT systems, beginning with the foundational technologies such as sensors, actuators, communication protocols, and cloud infrastructure that form the backbone of data collection, transmission, and storage. These technologies enable seamless data exchange between physical devices and digital platforms. Above this technological foundation lies the services layer, which includes real-time analytics, machine learning

algorithms, and application programming interfaces (APIs) that process, interpret, and derive actionable insights from IoT-generated data.

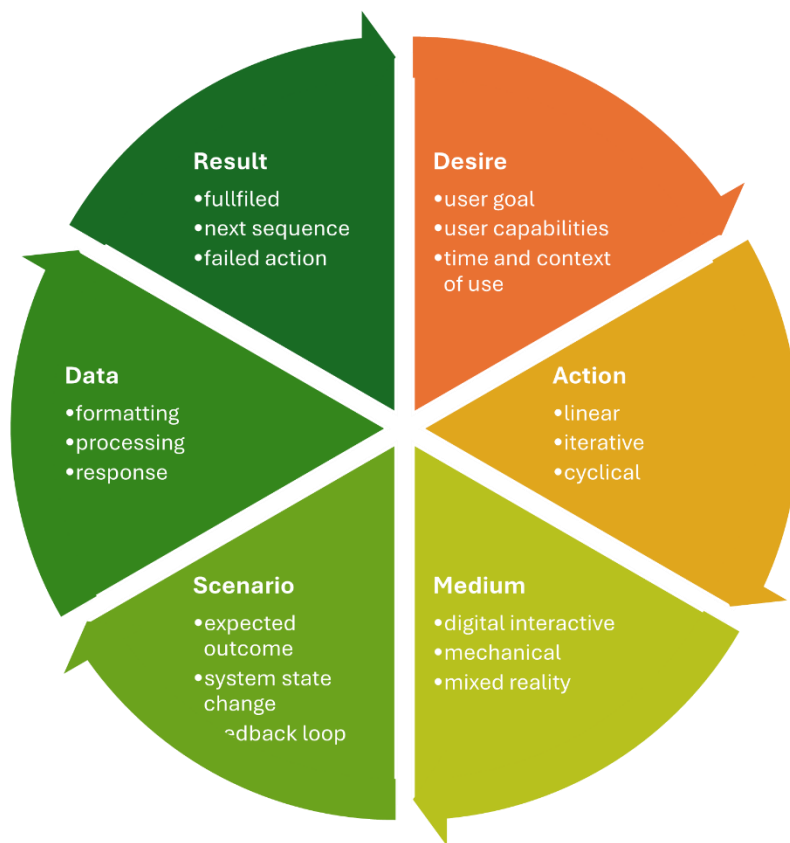


Figure 1 – Human-Computer Interaction System Process

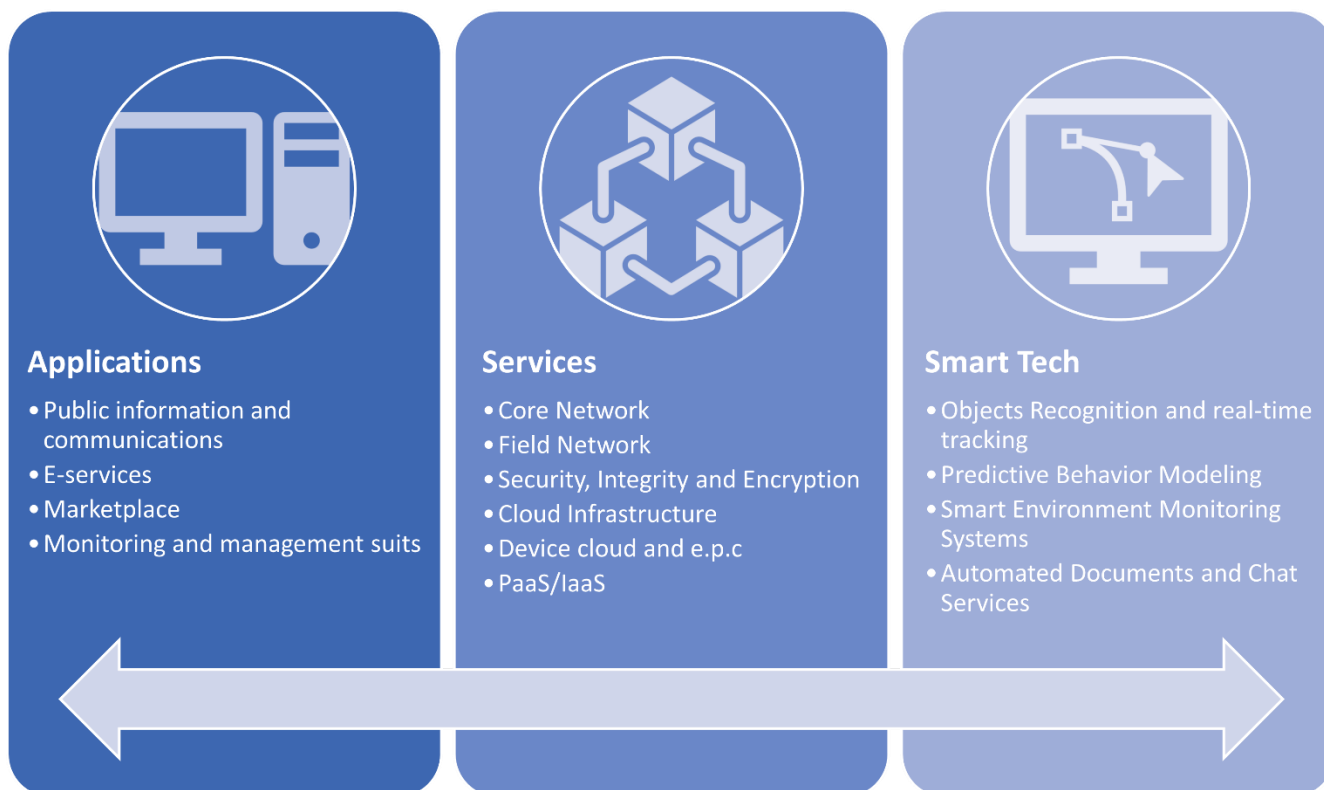


Figure 2 – Applications, services, and technologies for IoT system design and development

These services facilitate functionalities such as predictive maintenance, anomaly detection, and automation, which are essential for scalable IoT deployments. The applications layer, positioned at the top, highlights the diverse use cases of IoT across industries, including smart cities, healthcare, agriculture, manufacturing, and logistics. Each application leverages specific services and technologies to address industry-specific challenges, such as optimizing resource usage in smart homes, enabling remote health monitoring in healthcare, or enhancing supply chain efficiency in logistics. By categorizing the IoT ecosystem into applications, services, and technologies, the diagram provides a systematic approach to IoT system design, illustrating the dependencies and flow of data between layers while emphasizing the flexibility and scalability of these systems in real-world scenarios. This layered model also underscores the importance of interoperability and security considerations at every level, ensuring robust, efficient, and reliable IoT solutions.

Results. The human - user is at the core of software, applications, and system interaction design. The interaction process is initiated and sustained by the user's desire to achieve one or more specific goals (system tasks). Interaction systems serve as tools that facilitate the attainment of these objectives. Figure 3 demonstrates the user-centered interaction loop. The emphasis is placed on the feedback loop, which serves as an integral of the interaction process. This iterative processing system comprises the user interface components, input and output processing functions, and the transmission of commands to the primary system processor.

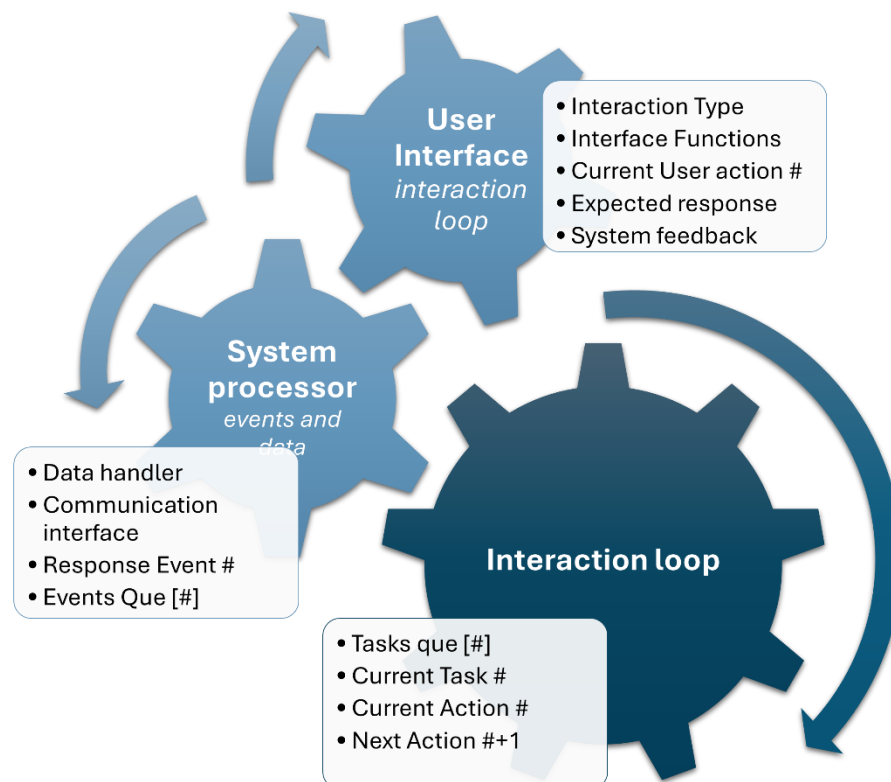


Figure 3 – Human application interaction system

Interaction processes do not occur in isolation but are embedded within real-world environments, a consideration that is particularly critical in industrial, medical, and mobile applications (professional usage). Figure 4 highlights the contextual factors (context of use for short) that should be considered for system design. Context of use influences how the user perceives and interacts with the application (system). An interactive iterative system must account for the environmental context, including the time, location, and conditions under which the device or application is utilized. Task-specific requirements and interaction activities mold user behavior, introducing system-level constraints and user-interaction limitations. Differentiating (extensive classification and research) user types and system usage purposes is crucial in the early stages of new

software application design. Industry-specific environments and professional usage scenarios often prioritize tasks to the end user's goals, which leads to sequential changes in user-system interaction flow. Figure 4 provides an in-depth visualization of these factors.

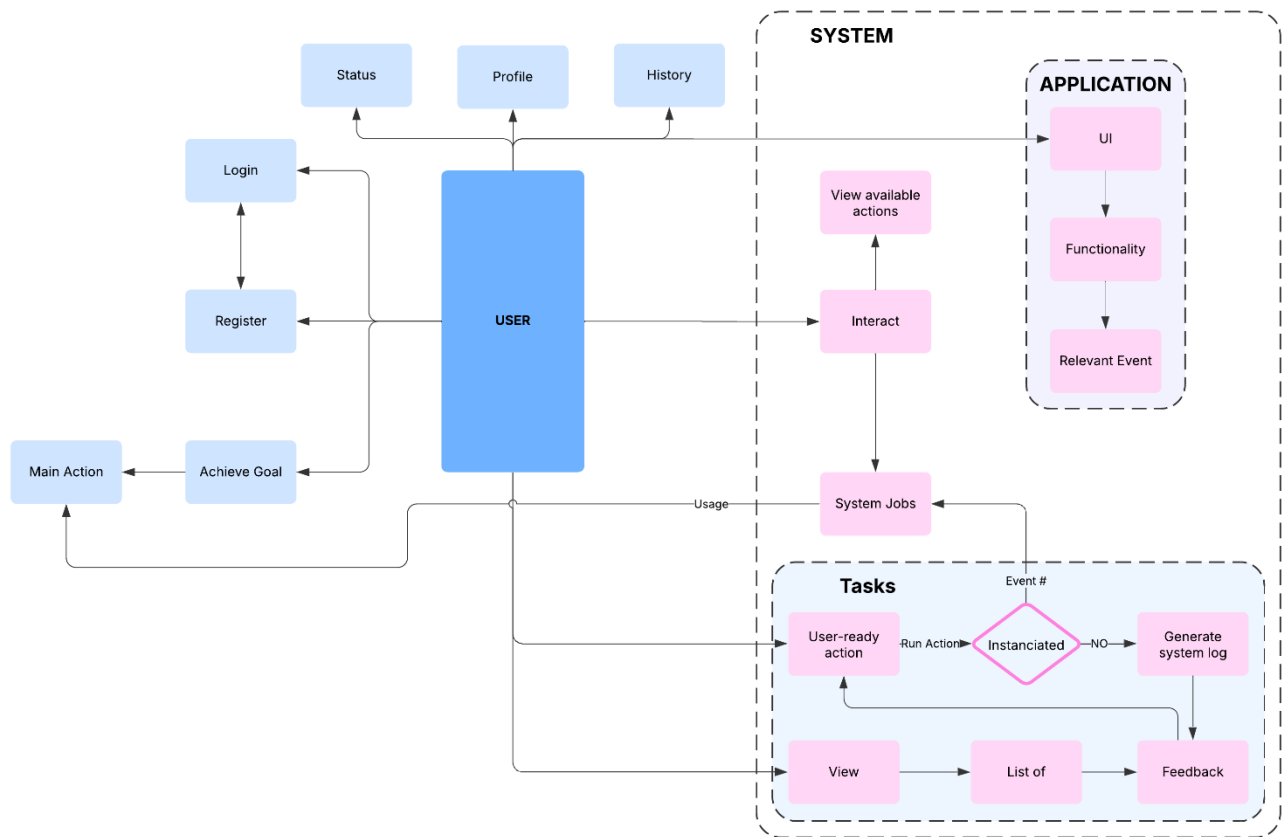


Figure 4 – Human application interaction system

The most crucial phases of human-system interaction, interaction, and feedback loops are presented in Figure 5. During this phase, two primary actors — the user and the computational system engage in an interaction cycle, with the system being a medium and processor within this context. Green highlighted rectangles represent Central System States, located at the diagram's center. The interaction process begins with a user action (task/job). Examples of system action can be inputting information or initiating task threads. The event queue and event manager record and process each sequential user action. As the user interacts with the application, he awaits a system response (feedback). In the meantime, the computational system actively participates in the loop by generating appropriate system-level responses and communication messages. This interaction process is part of a broader architecture encompassing server/client applications and database services, as illustrated in the lower section of Figure 5.

The six core modules (interaction phrases) of the interaction process are outlined in Table 2. Each interaction loop begins with system initialization (boot/loading) and concludes with system shutdown.

Once the system is operational, it activates the appropriate user interface or input-output system, enabling user interaction. The next-in-line phase involves the user-system interaction and feedback loop, which operate concurrently. Feedback and interaction can consist of an arbitrary number of steps determined dynamically by the user and the system. During each interaction cycle, the user can proceed to the next step, revert to the initial step, or terminate the system entirely. The loop concludes when the user ends the interaction; at this point, the system saves its state and powers down. Alternatively, the system may transition to a background operational state, monitoring for new inputs or events.

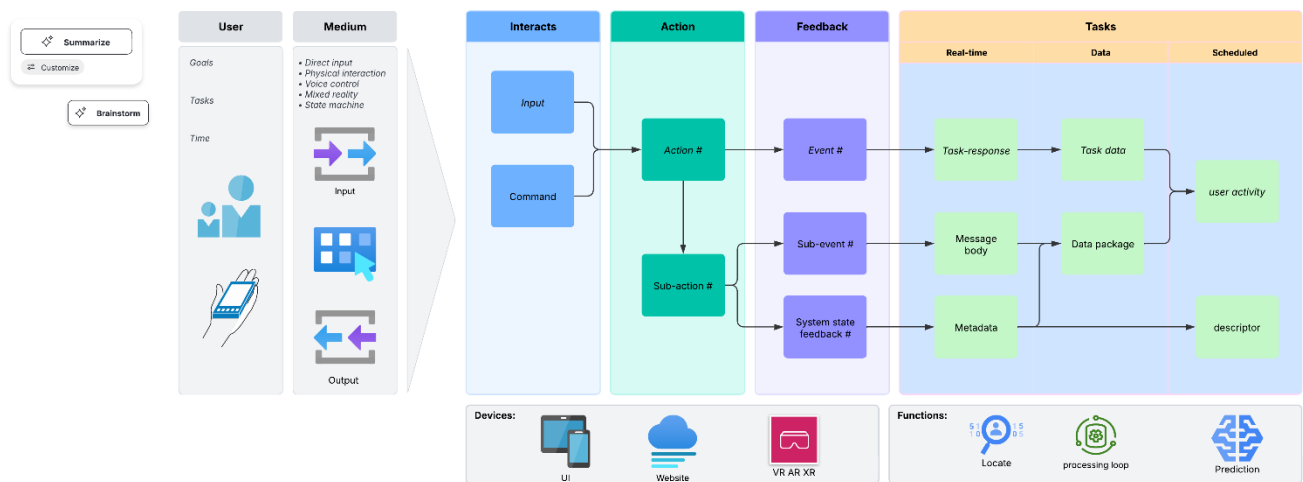


Figure 5 – Interaction process software system model

Table 2 – Interaction and feedback system modules*

System	Components	Data
Initial - loading state	User, device, power control	Saved and system initial parameters
Main user interface	GUI, manipulation device, interaction system	Text, graphical data, input data
Interaction cycle	Tasks manager, Event manager	activities, attributes, action-request
System response	Communication and post-processing	system state and comms data
Support system	Action evaluation, Feedback control, Prediction	metadata, control parameters
Final - shutdown state	Data and System state manager	saved user and device data

* prepared based on the author's work and public research data

Figure 6 provides an in-depth representation of the key architectural elements and their roles in facilitating interactive IoT system development. Middleware is a critical intermediary layer, bridging the gap between IoT devices, networks, and application services by providing a standardized platform for managing data, devices, and user interactions. Core components of this middleware include device management modules, which handle registration, authentication, and configuration of IoT devices, ensuring secure and reliable operation within the system. Data processing and storage modules are pivotal in collecting, filtering, and storing vast amounts of sensor data for subsequent analysis, employing techniques such as real-time data streaming and machine learning to derive actionable insights. Communication protocols like MQTT, CoAP, and HTTP enable efficient data exchange between heterogeneous IoT devices and the middleware platform, ensuring interoperability across diverse technologies [8].

Interactive system development is further supported by application programming interfaces (APIs) and software development kits (SDKs), which allow developers to integrate custom user interfaces, implement real-time feedback loops, and design user-centric interactions. These APIs enable seamless communication between the middleware and higher-level services or applications, ensuring modular and scalable system design. Event-driven architectures within middleware enhance system responsiveness by triggering predefined actions based on real-time sensor inputs, essential for interactive applications such as smart home systems or IoT-driven healthcare monitoring [6]. Furthermore, security features like encryption, role-based access control, and anomaly detection

safeguard user data and system integrity, addressing key challenges in human–computer interaction systems [7].

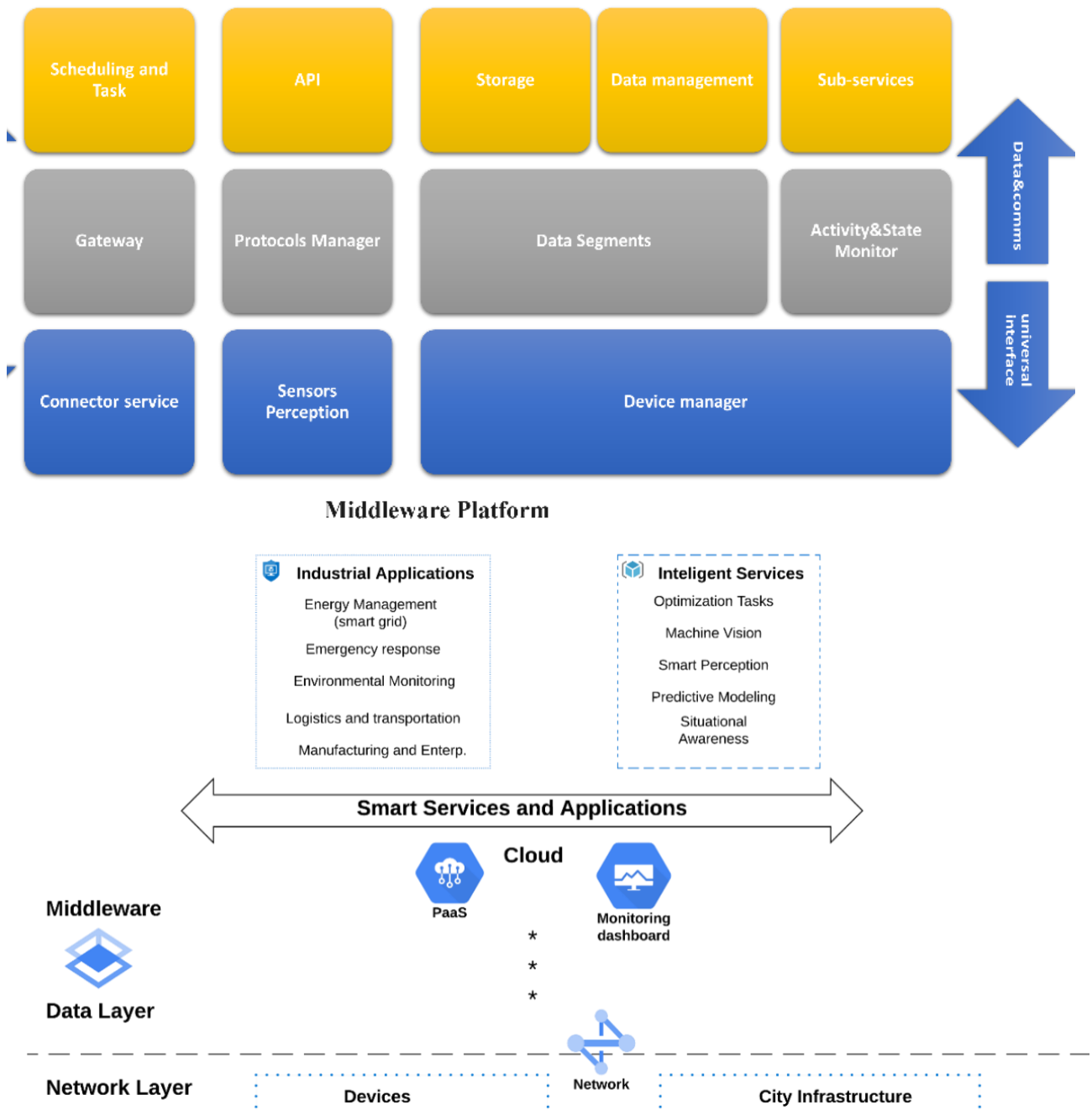


Figure 6 – Middleware IoT system components used for interactive system development

The diagram underscores the middleware's role in supporting hybrid intelligence by integrating human-in-the-loop feedback mechanisms, which refine system performance through iterative user input and interaction [14]. This is particularly relevant in systems where cognitive load or user trust plays a significant role, such as in interactive learning platforms or industrial IoT systems [17]. Overall, the middleware IoT system components provide a robust, flexible, and secure framework for developing interactive systems, enabling real-time, context-aware, and user-friendly solutions across various applications.

Table 3 illustrates the multilayered architecture of an interactive middleware system, highlighting the hierarchical structure and detailing the essential components and subsystems required for IoT systems. The design is divided into three primary layers: the hardware endpoint

devices, the central core application management services, and distributed services and applications, each serving distinct but interconnected roles in the middleware framework.

*Table 3 – Interactive middleware system design layers**

Conceptual system layer	Underlying subsystems	Main layer components
Hardware endpoint devices	Sensor and Actuator Router/Network Device Signal Converter Driver and Firmware Kernel Basic notification/indication	Power supply Device memory Hardware Data Communication Protocol Connectivity Low-level code Local address
Primary core application management services	Device Configurator Network Configurator Device Authentication (secure) Communication Optimization Protocols Event manager Events System Adaptation System	(local) Network Data segments Comms Protocols Device (cluster) address Message input/output Control code Listeners
Distributed services and applications	Data Connectors Data en(de)-encryption Input/output transfer Visualization/Graphics Application Communication Virtual Machine Main Server Additional Servers	API connectivity Communication protocol Data packages Database(s) Server-level code OS Network layers

* prepared based on the author's work and public research data

This foundational layer comprises the physical devices and essential hardware components that interact with the external environment. Key elements include sensors and actuators, which are responsible for data collection and execution of commands, and routers or network devices that facilitate connectivity. Supporting components such as signal converters, drivers, firmware, and the kernel enable the hardware to operate efficiently and communicate effectively with higher layers. Additional features like power supply systems, device memory, and communication protocols ensure reliable operation. Low-level functionalities, such as basic notification/indication mechanisms and local address assignments, ensure seamless data transmission and device operation. Together, these elements form the hardware foundation upon which the middleware's higher layers rely.

This intermediate layer acts as the brain of the middleware system, managing devices and networks while ensuring secure and efficient communication. Core components include the device and network configurators, which oversee the setup and optimization of devices and communication networks. Secure communication protocols and device authentication mechanisms provide robust security against unauthorized access. Additionally, the optimization protocols ensure efficient resource allocation, and event management systems enable responsive, context-aware functionalities. This layer also incorporates event systems and adaptation mechanisms to handle dynamic changes in the environment or system configuration. These services are vital for creating scalable and adaptive interactive systems capable of real-time operation.

The topmost layer of the middleware system supports higher-level functionalities, including data handling, application management, and user interface integration. Key components such as data connectors and encryption/decryption mechanisms enable secure and efficient data transfer across the system. This layer also includes input/output transfer modules, visualization, and application

communication, providing end-users with actionable insights and a user-friendly interface. Advanced components such as virtual machines, main and additional servers, and API connectivity facilitate scalability and interoperability. Integrating communication protocols, databases, and server-level code ensures seamless interaction between distributed devices and applications. Including network layers and operating systems in this layer highlights its comprehensive role in supporting distributed and scalable IoT ecosystems.

This layered design framework ensures that interactive middleware systems are modular, secure, and adaptive, supporting a wide range of applications and enabling seamless integration of IoT devices into real-world systems.

Discussion. The novel state-of-the-art user interface systems (UIs) can be classified as multilayered and complex systems. Their design and development extend far beyond traditional single-button or keyboard-based interactions. Many user-interaction devices and output mediums, such as mobile phone screens, VR glasses, gamepads, and other controllers, are available and actively used. Their range of usage varies from day-to-day tasks to specific industry or job-role-specific tasks. It should be noted that the range of input-output systems is more comprehensive than the provided examples and goes beyond the listed scenarios (use cases). This research shows that user interactions encompass numerous stages and steps with diverse potential interaction activities.

As detailed in this study, iterative feedback loops are a critical part of human-computer interaction (HCI) systems and one of the user-application core tasks. The HCI is mostly cyclical (iterative) and is centered on tasks and activities initiated by the user (or, in some cases, systems, if such behavior had been programmed in advance or is part of smart autonomy system design) and subsequently processed by the system. The context of use plays a pivotal role in the interaction cycle, offering interaction-system designers valuable insights into the user environment. It helps answer critical design-time questions on when and how the user will utilize the system in real-time within the scope of the intended scenario.

As outlined in this work, the interaction process consists of several steps, components, actors, and systems. Each application constitutes unique interaction and feedback loops. Despite these variations, the implementation of interaction systems can be standardized through system abstractions and algorithmic approaches, such as feedback loop algorithms. This systematic approach enhances the design and usability of interaction systems across diverse applications and environments.

In conclusion, the proposed engineering design framework for smart and intelligent IoT interaction systems provides a structured and adaptable approach to developing user-centric, scalable, and secure solutions for diverse IoT applications. The framework addresses critical challenges in IoT system development, including interoperability, data security, and real-time adaptability, by integrating layered middleware components, advanced user interface design principles, and robust human-computer interaction mechanisms. The detailed breakdown of hardware endpoint devices, core application management services, and distributed services highlights the interdependencies within the system, ensuring seamless operation across diverse environments. Furthermore, including hybrid intelligence through human-in-the-loop mechanisms enhances system responsiveness and user trust. This research contributes to the field by offering a comprehensive blueprint for IoT systems that effectively combine embedded systems, innovative technologies, and interactive functionalities to meet the evolving demands of modern applications, such as healthcare, smart cities, and industrial automation.

References

1. Borchers, J. O. (2000). A pattern approach to interaction design. Proceedings of the 3rd Conference on Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, and Techniques (DIS' 00), 369–378. <https://doi.org/10.1145/347642.347795>
2. Löwgren, J. (n.d.). Interaction design - brief intro. Interaction Design Foundation. Retrieved November 30, 2024, from <https://www.interaction-design.org/literature/book/the-encyclopedia-of-human-computer-interaction-2nd-ed/interaction-design-brief-intro>

3. Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J., & Poupyrev, I. (2001). An introduction to 3-D user interface design. *Presence*, 10(1), 96–108. <https://doi.org/10.1162/105474601750182342>
4. LaViola, J. J., Jr. (2008). Bringing VR and spatial 3D interaction to the masses through video games. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 28(5), 10–15. <https://doi.org/10.1109/MCG.2008.92>
5. Zhu, Y., Sun, F., Jia, C., Huang, C., Wang, K., Li, Y., Chou, L., & Mao, Y. (2022). A 3D printing triboelectric sensor for gait analysis and virtual control based on human-computer interaction and the Internet of Things. *Sustainability*, 14(17), 10875. <https://doi.org/10.3390/su141710875>
6. Nazari Shirehjini, A. A., & Semsar, A. (2017). Human interaction with IoT-based smart environments. *Multimedia Tools and Applications*, 76(11), 13343–13365. <https://doi.org/10.1007/s11042-016-3697-3>
7. Wang, K. (2021). Human-computer interaction design of intelligent vehicle-mounted products based on the internet of things. *Mobile Information Systems*, 2021, 6795440. <https://doi.org/10.1155/2021/6795440>
8. Fischer, F., Fleig, A., Klar, M., & Müller, J. (2022). Optimal feedback control for modeling human–computer interaction. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 29(1), Article 1. <https://doi.org/10.1145/3524122>
9. Ritter, W. (2011). Benefits of subliminal feedback loops in human-computer interaction. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2011, 346492. <https://doi.org/10.1155/2011/346492>
10. Honeycutt, D. R., Nourani, M., & Ragan, E. D. (2020). Soliciting human-in-the-loop user feedback for interactive machine learning reduces user trust and impressions of model accuracy. *Proceedings of the AAAI Conference on Human Computation and Crowdsourcing*, 8(1). <https://doi.org/10.1609/hcomp.v8i1.7464>
11. Palanque, P., Cockburn, A., & Gutwin, C. (2020). A classification of faults covering the human-computer interaction loop. In A. Casimiro, F. Ortmeier, F. Bitsch, & P. Ferreira (Eds.), *Computer Safety, Reliability, and Security* (pp. 434–448). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54549-9_29
12. Nazarenko, V. (2024). Interaction and feedback loops in user interface for digital engineering design. *Information Technologies in Economics and Environmental Management*, 0, 46–54.
13. Savidis, A., & Stephanidis, C. (2004). Unified user interface design: Designing universally accessible interactions. *Interacting with Computers*, 16(2), 243–270. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2003.12.003>
14. Wiethof, C., & Bittner, E. A. (2021). Hybrid intelligence - Combining the human in the loop with the computer in the loop: A systematic literature review. In *ICIS 2021 Proceedings*.
15. Costabile, M. F., Fogli, D., Mussio, P., & Piccinno, A. (2007). Visual interactive systems for end-user development: A model-based design methodology. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 37(6), 1029–1046. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2007.904776>
16. Ju, W., & Leifer, L. (2008). The design of implicit interactions: Making interactive systems less obnoxious. *Design Issues*, 24(3), 72–84. <https://doi.org/10.1162/desi.2008.24.3.72>
17. Hollender, N., Hofmann, C., Deneke, M., & Schmitz, B. (2010). Integrating cognitive load theory and concepts of human–computer interaction. *Computers in Human Behavior*, 26(6), 1278–1288. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2010.05.031>
18. Ramírez, J. G. C. (2024). Natural language processing advancements: Breaking barriers in human-computer interaction. *Journal of Artificial Intelligence General Science*, 3(1), 31–39. <https://doi.org/10.60087/jaigs.v3i1.63>
19. Nazarenko, V. A., & Ostroushko, B. P. Smart city management system utilizing micro-services and IoT-based systems. *Energy and Automation*, (1), 29–38. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya1\(71\).2024.029](http://dx.doi.org/10.31548/energiya1(71).2024.029)

Назаренко Володимир Анатолійович

доктор філософії., доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,
Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7433-2484>

E-mail: volodnz@nubip.edu.ua

Остроушко Богдан Павлович

асистент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0849-8990>

E-mail: b.ostroushko@nubip.edu.ua

ПОКРАЩЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЛЮДИНИ ТА КОМП'ЮТЕРА: РОЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ КОРИСТУВАЧА У ВБУДОВАНИХ ТА ІОТ СИСТЕМАХ

Анотація. Стрімкий розвиток інноваційних технологій у сучасному світі суттєво змінив цифрові додатки та діяльність людини в цілому. Прогрес у галузях апаратного забезпечення, цифрового програмного забезпечення та інтерактивних інтерфейсів користувача зробив дизайн користувацького досвіду (UX) критично важливим фактором у різних галузях, включаючи охорону здоров'я, аерокосмічну, будівельну та військову галузі. Взаємодія людини та комп'ютера (HCI) має важливе значення для підвищення зручності використання системи шляхом забезпечення того, щоб інтелектуальні системи взаємодії були орієнтовані на користувача та максимально доступними. Інтеграція інтелектуальних систем, Інтернету речей (IoT) та вбудованих технологій відкриває нові виклики та можливості у дизайні інтерфейсів. Крім того, у міру впровадження нових інтелектуальних систем автоматизації та цифрової трансформації, зростає попит на адаптивні, зручні для користувача інтерфейси. Розуміння того, як користувачі взаємодіють із цими технологіями, має важливе значення для оптимізації ефективності та підвищення загальної задоволеності користувачів. У даній роботі досліджуються принципи HCI та дизайну взаємодії; аналізується, як цифрові аналогові інтерфейси сприяють практичному використанню системи. Авторами використано якісний підхід, враховуючи сучасні дослідження дизайну інтерфейсу користувача (UI), інтерактивних систем та інтелектуальних додатків. У дослідженні також розглядаються приклади з різних галузей, де UX та оптимізація інтерфейсу значно вплинули на продуктивність системи та задоволеність користувачів. Збір даних включав аналіз літератури, інтерв'ю з експертами та звіти про тестування юзабіліті, що забезпечує всебічне розуміння проблем та досягнень у дизайні взаємодії. Методологія дослідження також включає порівняльний аналіз традиційних і нових моделей інтерфейсів для виявлення кращих практик проектування адаптивних та інтелектуальних систем. Результати показують, що добре розроблені інтерфейси підвищують залученість користувачів, ефективність та функціональність системи. Фактори, що впливають на зручність використання, включають адаптивний дизайн, міркування доступності та інтуїтивно зрозумілий досвід користувача. Тематичні дослідження показують, що галузі, які включають сучасні принципи UX та інноваційні технології взаємодії, демонструють підвищену операційну ефективність та задоволеність користувачів. Крім того, результати свідчать про те, що інтеграція підказок-користувачу на основі штучного інтелекту, механізмів зворотного зв'язку в режимі реального часу та мультимодальної взаємодії значно покращує адаптивність користувачів та ефективність системи. У дослідженні підкреслюється важливість зниження когнітивного навантаження при дизайні інтерфейсу, наголошуючи на таких стратегіях, як прогностна аналітика та контекстно-залежні обчислення для покращення взаємодії з користувачами. Результати показують важливість HCI у проектуванні зручних та ефективних систем. Наголошується на необхідності постійних інновацій в UX та дизайні інтерфейсів, особливо в нових галузях, таких як IoT та вбудовані системи. Слід підкреслити роль штучного інтелекту, машинного навчання та доповненої реальності у формуванні майбутнього взаємодії з користувачами. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на подальшій інтеграції персоналізації та адаптивних інтерфейсів на основі штучного інтелекту для покращення користувацького досвіду. Отримані результати свідчать про те, що міждисциплінарна співпраця між інженерами, дизайнерами та вченими-когнітивістами має важливе значення для розробки більш ефективних та орієнтованих на людину систем взаємодії. Врахування етичних міркувань, таких як конфіденційність та доступність даних, забезпечить справедливий та інклюзивний дизайн у майбутніх технологічних досягненнях.

Ключові слова: дизайн інтерфейсу користувача, користувацький досвід, розумні системи, системна взаємодія, комп'ютерна інженерія.

УДК 004.056.55

Сагун Андрій Вікторович

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-9203>

E-mail: a.sagun@nubip.edu.ua

Місюра Максим Дмитрович

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9061-3462>

E-mail: mdm@nubip.edu.ua

Білич Мілана Сергіївна

бакалавр, Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: kib22-m.bilych@nubip.edu.ua

ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ ЯКОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕШ-ФУНКЦІЙ

Анотація. Запропонована технологія аналізу якості геш-функції. Для перевірки якої спеціально розроблена геш-функція, яка є спрощеним аналогом MD5. Показано, що традиційна оцінка якості отриманих геш-значень на основі наявності кількості колізій має суттєвий недолік - висока обчислювальна складність. Тому, технологія оцінки якості зводиться до апроксимації аналітичного виразу функції, який піддається математичному аналізу традиційними методами, застосовними до поліномів. Більш якісною геш-функцією вважається та геш-функція, гістограма якої є максимально наближеною до графіку функції $y=x$. Це буде відповідати гаусівському розподілу величин. При використанні запропонованої технології необхідно розробити критерії класифікації функцій за відхиленнями від ідеального розподілу значень за одним або декількома з таких показників, як: дисперсія; математичне очікування; середнє арифметичне; середнє геометричне значення тощо.

Ключові слова. Геш-функція, колізії, інтерполяція функції, апроксимація функції, якість геш-функції

Вступ. Відомо, що основним параметром, за яким характеризується та чи інша геш-функція є кількість колізій, наявність чи відсутність колізій [1,2]. Виявлення колізії для ідеального випадку дослідження якості геш-функції має проводитися для великого діапазону вихідних значень $H(x)$. Тільки в такому випадку результати дослідження можуть визнаватися статистично значущими [1-3]. Ймовірність колізії в геш-функції часто оцінюється за парадоксом днів народження, який базується на кількості можливих вихідних значень N (розмірність хешу) [4,5]. Даний підхід є найбільш оптимальний з точки зору витраченого часу і прийнятний стосовно точності отриманого показника якості функції.

Тому, підхід оцінки якості функцій за методом навіть часткового перебору, навіть, з огляду на його визнану високу точність і прийнятність отриманих результатів, часто складно застосувати через занадто високі часові витрати на реалізацію.

Аналіз графічних відображень результатів отриманих вихідних значень геш-функції є важливим для оцінки рівномірності та випадковості її поведінки. Хоча, загалом, частіше використовують математичні методи дослідження геш-функцій, але включення до методик оцінювання якості геш-функцій результатів візуалізації вихідних значень значно доповнює і унаочнює статистичний аналіз отриманого статистичного розподілу.

Мета дослідження – створення та вдосконалення методів візуалізації та аналізу графічного представлення вихідних даних геш-функцій, що дозволить оцінювати їх криптографічні властивості, такі як аваланч-ефект, рівномірність розподілу та стійкість до колізій.

Результати дослідження. Припустимо, що ми маємо геш-функцію виду $H(x)$, яка повертає вихідне значення фіксованої довжини. Для математичного аналізу можна використати наступні результати графічної візуалізації її значень [6]:

1. Графік залежності значення хешу від вхідних даних. Для певного набору вхідних значень x (наприклад, $x = 1,2,3$), обчислюємо відповідні значення $H(x)$.

Отримані значення функцій можливо візуалізувати у вигляді точкового графіку або гістограми.

Далі з'являється можливість перевірити рівномірність отриманого розподілу значень функції $H(x)$.

2. Аналіз біткарт (Bit Distribution Analysis). Такий вид графічного аналізу передбачає, що кожен вихідний хеш можна порівняно легко представити у вигляді двовимірного бітового зображення (наприклад, 1024-бітні значення у вигляді матриці розмірністю 32×32).

В такому випадку графічна візуалізація отриманих результатів гешування дає змогу перевірити, чи існують ти чи інші закономірності у вихідних бітових послідовностях.

3. Графік змін у вихідному значенні при малих змінах вхідних даних (Avalanche Effect Analysis). При такому виді дослідження графіку вихідних значень геш-функції для кожного вхідного значення x обчислюємо значення функції $H(x)$ і $H(x + 1)$, а потім вимірюємо отриману різницю в бітах.

Висновок стосовно якості отриманої робиться на основі характеру зміни вхідних даних, в залежності від зміни вхідних значень:

- геш-функція вважається якісною, якщо зміна хоча б одного біта у вхідних даних призводить до змін у значній кількості бітів вихідного значення (ефект лавини).

- в іншому випадку геш-функція $H(x)$ вважається неякісною.

Для ілюстрації роботи даного методу будується графік, що показує кількість змінених бітів у хеші для кожної зміни у вхідному повідомленні.

Для прикладу розробимо геш-функцію з такими характеристиками:

1) розрядність вихідних значень функції – 128 біт;

2) на вхід такої функції може подаватися будь-яка послідовність, довжиною до 1 Мбіт (1 048 576 біт);

3) підготовка вхідної послідовності з доповнення реалізуємо аналогічно до описаного у відкритих джерел для геш-функції md5 [7].

5) механізм «перемішування» (permutation) даних в розроблюваній геш-функції реалізуємо по аналогії з алгоритмом функції md5 [7].

6) обрахуємо параметри якості отриманої геш-функція по таким параметрам: дисперсія, математичне очікування тощо на широкій вибірці вихідних значень типу «геш-128» та побудуємо відповідні ілюстративні графіки якісних параметрів хеш-функції.

Отримаємо результати оцінки якості геш-функції з використанням методів математичної статистики:

- математичне очікування: 9410810830297161728

- дисперсія: 28080520602751215165548159324164980736

- кількість колізій: 0 (на вибірці з 850 тестів).

На основі отриманих даних побудуємо гістограму розподілу значень створеної геш-функції. На гістограмі по осі X будуть відображатися отримані геш-значення (64-бітові числа), а по осі Y – значення статистичного показника частоти появи певних геш-значень серед випадкових тестових вхідних 1024 бітових повідомлень, які генеруються програмною реалізацією алгоритму розробленої геш-функції (рис. 1).

Наведена на рис. 1 гістограма дозволяє візуально оцінити дисперсію отриманих 850 значень геш-функції. Хоча для такої кількості вхідних значень колізій знайдено не було, але повний цикл пошуку колізій мав би охопити доволі багато значень. Так, для знаходження колізії потрібно перебрати всі можливі вихідні значення. Оскільки вихід має 128 біт, то кількість можливих унікальних гешів складе: $2^{128} \approx 3,4 \times 10^{38}$. Це означає, що в гіршому випадку потрібно перевірити $3,4 \times 10^{38}$ унікальних вхідних значень, щоб гарантовано знайти

колізю. При використанні атака типу «день народження» [8] можна зменшити перебір до $2^{64} \approx 1,8 \times 10^{19}$ ітерацій. Це значно швидше, але все одно дуже обчислювально складно.

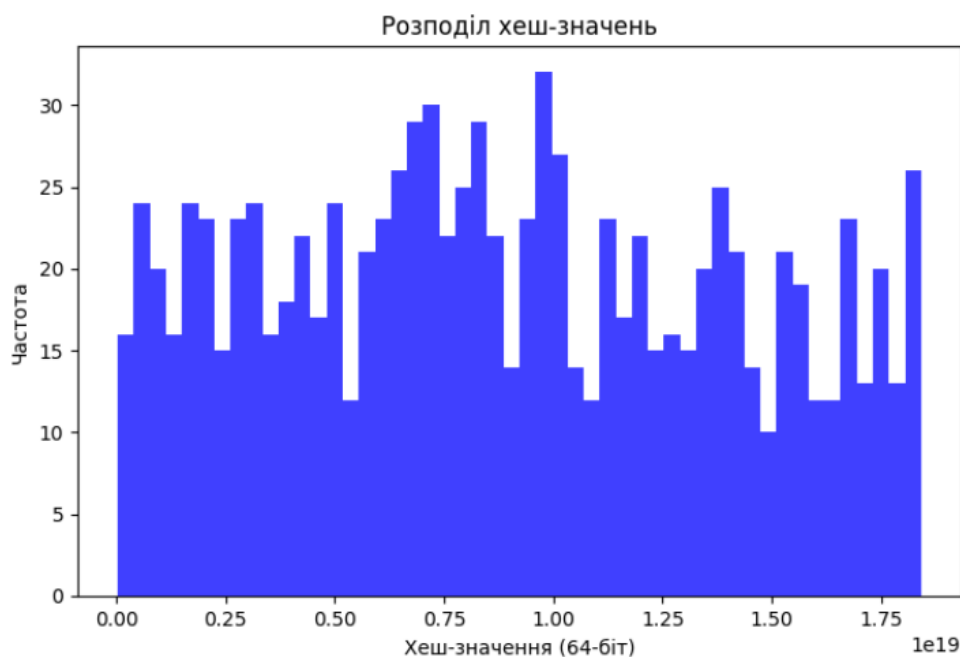


Рисунок 1 – Гістограма частоти розподілу вихідних значень створеної геш-функції в першій ітерації

Якщо для перебору всіх можливих значень аргументу розробленої функції використати сучасну відеокарту, наприклад NVIDIA RTX 4090. То, для відомого і співставного з розробленим за складність алгоритму MD5 (має 128-бітний вихід) обчислювальна потужність дозволяє обчислювати 200-300 млрд гешів на секунду (тобто 2×10^{11} до 3×10^{11} хешів/сек) для перебору всіх можливих значень потрібно від 1.13×10^{27} секунди $\approx 3,6 \times 10^{19}$ років.

За умови здійснення більш оптимальної атаки «дня народження» обчислювальна складність становитиме: $2^{64} \approx 1.8 \times 10^{19}$ ітерацій, а час обчислення складе: 6×10^7 секунд = 1,9 років.

Відновлення аналітичного виразу функції та аналіз її графічної характеристики.

Математичний метод відновлення функції за відомими координатами точок називається інтерполяція або апроксимація. Отже, маючи графік вихідних значень геш-функції можна отримати аналітичний вираз даної функції та піддати її математичному аналізу.

Маємо потребу відновити функцію точно, то можна використовувати інтерполяцію. В іншому випадку використовують апроксимацію (якщо відомо, що існуючі дані містять похибки). Через те, що вихідні результати похибок не мають, то використовуємо апроксимацію.

Для отримання аналітичного виразу даної функції використаємо координати точок, отриманих за результатами попередніх розрахунків, що відповідають графіку, наведеному на рис. 1.

Побудуємо аналітичний вираз функції, використовуючи інтерполяційний поліном Лагранж, сплайн-інтерполяцію або метод найменших квадратів [9]. За результатами проведених спроб, метод Лагранжа виявився нестабільним через велику кількість точок. Тому, використовуємо інтерполяцію цих точок за допомогою поліноміальної апроксимації. Для цього використаємо метод найменших квадратів для знаходження полінома, який найкраще підходить до цих даних [9].

Апроксимована функція для отриманих значень гістограми для 1 випадку:

$$y_1 = 0.0002x^3 - 0.0492x^2 + 3.0819x - 14.1699.$$

Апроксимована функція для отриманих значень гістограми для 2 випадку:

$$y_2 = -4.000866 \times 10^{-58}x^3 + 4.213750 \times 10^{-38}x^2 - 6.461849 \times 10^{-19}x + 21.80919.$$

Апроксимована функція для отриманих значень гістограми для 3 випадку:

$$y_3 = -3.89 \times 10^{-57}x^3 + 1.09 \times 10^{-37}x^2 - 7.02 \times 10^{-19}x + 20.19.$$

Після 5 повторів тестів генерування значення параметрів геш-функції на інтервалі були систематизовані і для кожного з набору значень було реалізовані спроби відновлення аналітичного виразу функції з використанням поліноміальної апроксимації, а не інтерполяції.

Вибір апроксимації продиктований тим, що необхідно відновити вираз, який "підходить" під більшість даних, тобто мінімізує загальну похибку по всіх відомих точках.

Це дозволяє отримати функцію, яка не обов'язково проходить через усі точки, але найкраще описує тенденції.

В той час, як інтерполяція є процесом знаходження полінома, який точно проходить через всі задані точки, а це, як видно з рис. 1, 2 і 3 є складною задачею.

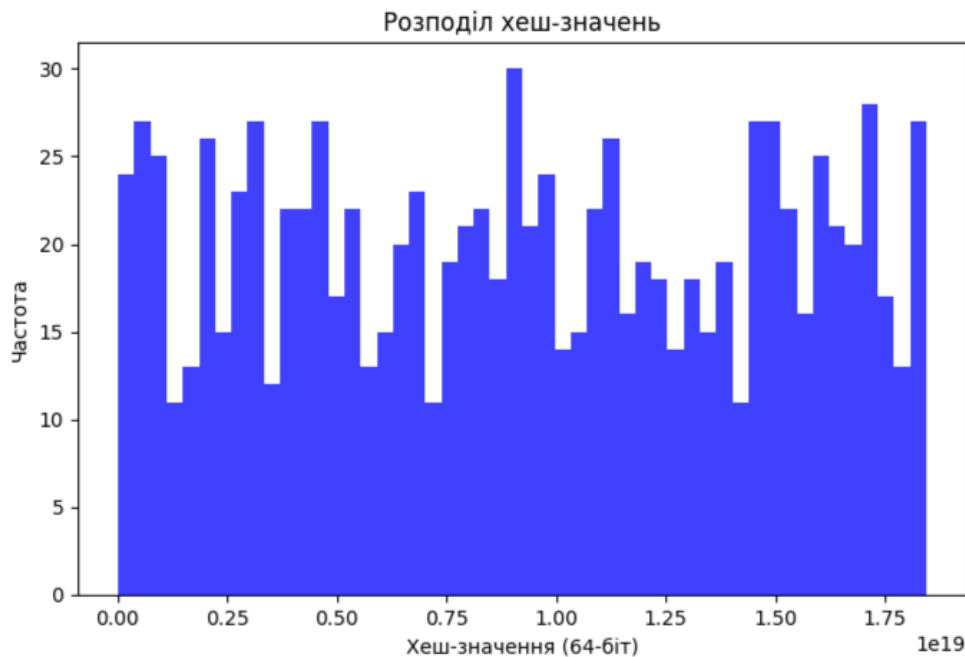


Рисунок 2 – Гістограма частоти розподілу вихідних значень створеної геш-функції в другій ітерації

Фактично, всі з наведених вище аналітичних функцій характеризують поведінку вихідного розподілу 128-бітних геш-значень розробленої функції $H(x)$.

Отже, математичний аналіз для випадку графічної характеристики геш-функції більш практичний. Це пов'язано з наявністю відповідних засобів математичного аналізу та значно меншим часом отримання результату перевірки на якість.

Формула для очікуваної кількості колізій при k випадкових хешах виглядає так:

$$P \approx 1 - e^{-\frac{k^2}{2N}}.$$

Якщо потрібно знайти таке значення параметру k , при якому кількість колізій стане більш помітною, то можна наступним виразом:

$$k \approx 1.2\sqrt{N},$$

де k — кількість гешів, які потрібно згенерувати для отримання хоча б однієї колізії з достатньо великою ймовірністю; $N = 2^N$ — загальна кількість всіх можливих значень хешу n -бітного хешу.

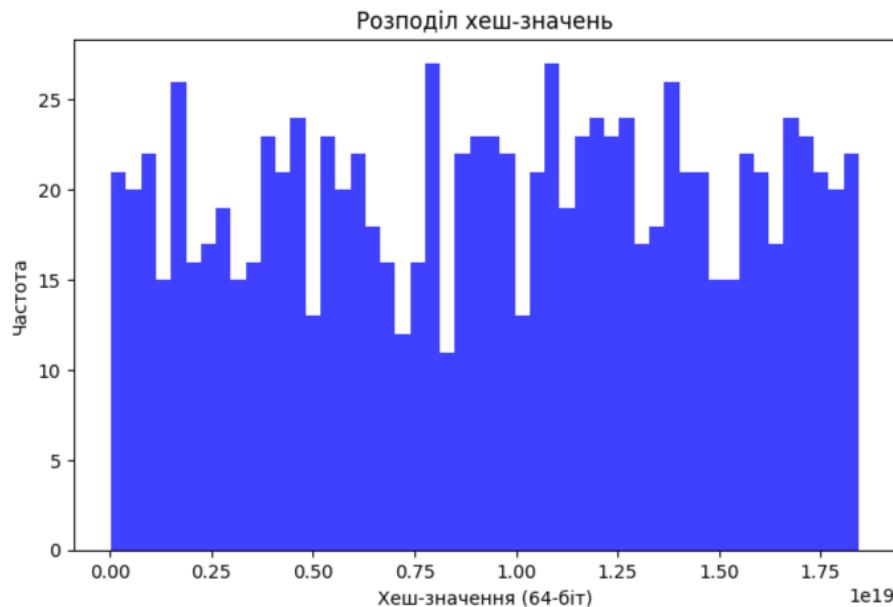


Рисунок 3 Гістограма частоти розподілу вихідних значень створеної геш-функції в третій ітерації

Для порівняння досліджувалася геш-функція MD5. Вона генерує на виході 128-бітні хеші, тобто $N = 2^{128}$.

Для такої функції параметр $k \approx 1,2\sqrt{2^{128}} = 1,2 \times 2^{64} \approx 2^{64}$. Щозначає, що знадобиться приблизно 2^{64} різних хешів, для того, щоб отримати з високою ймовірністю хоча б одну колізію.

В той же час, відомо, що якщо потрібно отримати статистично значущу оцінку частоти колізій, то бажано для розробленої функції перевірити значно більшу вибірку [4-5], наприклад, 10^{20} або, навіть, більше хешів.

Після проведення аналізу програмної реалізації алгоритму геш-функції md5 (опис алгоритму взятий з відкритого джерела [10]) виявлялися 1000 повторень серед можливих 10^9 хешів. В результаті отримано емпіричний показник частоти колізій, який можна порівняти з теоретичними очікуваннями.

Цей показник приблизно співпадає з тим, що отримано для розробленої геш-функції (в межах статистичної помилки $\mu \in \pm(0 \dots 3)\%$).

Висновки та перспективи. В контексті оцінки якості практичну користь можуть давати не результати математичного аналізу відновленого за отриманими значеннями функції її аналітичного вигляду, а традиційні показники якості геш-функції, отримані з використанням математичної статистики, наприклад, такі, як:

- дисперсія;
- математичне очікування;
- середнє арифметичне;
- середнє геометричне значення тощо.

Однак, в такому випадку вимагає розробки критерії класифікації функцій за відхиленнями від ідеального розподілу значень за одним або декількома з таких показників.

Як показано в основній частині оцінки якості геш-функції на основі даних про колізії є занадто обчислювально складним і недоцільним для практичного застосування. З огляду на те, що для оцінки кількості колізій навіть відносно простої функції md5, потрібно проаналізувати принаймні $1,2\sqrt{N}$ значень хеш-функції, але для отримання більш точних даних необхідно збільшити цю кількість у декілька разів. Для всіх 128-бітних геш-функцій для цього потрібно провести приблизно $2^{64} \approx 18$ квінтільйонів значень. Тільки тоді можна отримати гарантовано високу ймовірність знаходження колізії. В той же час розглянутий альтернативний метод визначення якості геш-функції дозволяє зробити це на порядок швидше (залежно від структури алгоритму дослідженої функції вимагає додаткових досліджень).

З проведених вище досліджень можна побачити, що традиційний математичний аналіз інтерпольованих значень геш-функції для випадку графічної характеристики такої геш-функції є заскладним і малозручним для практичного застосування. Хоча такий аналіз і може бути перспективним для деяких випадків (вимагає подальших досліджень).

Перспективи вдосконалення. Більш раціональним може бути візуальний швидкий аналіз отриманої гістограми якості. В такому випадку більш якісною буде вважатися та геш-функція, гістограма якої буде максимально наближено до графіку функції $y = x$. Це буде відповідати рівномірному розподілу значень (гаусівський розподіл) [11].

Для того, щоб створити умови для практичного застосування запропонованого методу оцінки слід провести додаткові дослідження, створити класи якості, ранжовані з допустимими від ідеальної функції відхиленнями.

Список використаних джерел

1. Wang, X., & Yu, H. (2005). Collisions of SHA-1: Second-preimage and preimage attacks. Crypto 2005 Rump Session. <https://www.iacr.org/archive/crypto2005/36210017/36210017.pdf>.
2. Rivest, R. (1992). The MD5 Message-Digest Algorithm (RFC 1321). Internet Engineering Task Force (IETF). <https://doi.org/10.17487/RFC1321>.
3. Tanasiuk, Yu. V., Melnychuk, Kh. V., & Ostapov, S. E. (2017). Rozrobka i doslidzhennia kryptohrafichnykh khash-funktsii na osnovi klitynnykh avtomativ [Development and research of cryptographic hash functions based on cellular automata]. *Systemy Obrobky Informatsii [Information Processing Systems]*, 4(150), 122–127.
4. Brassard, G., Høyer, P., & Tapp, A. (1998). Quantum cryptanalysis of hash and claw-free functions. In C. L. Lucchesi & A. V. Moura (Eds.), *LATIN'98: Theoretical informatics* (pp. 163–169). Springer. <https://doi.org/10.1007/BFb0054319>.
5. Bellare, M., & Rogaway, P. (2005). The birthday problem. In *Introduction to modern cryptography* (pp. 273–274). <https://web.cs.ucdavis.edu/~rogaway/classes/227/spring05/book/main.pdf>.
6. Horra, E., Beyene, A., & Yitagesu, S. (2024). Enhanced avalanche effect analysis algorithm considering both single and double key pair RSA algorithms (Preprint). Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4113962/v1>.
7. Telegin, V. (2023). Analysis of cryptographic strength of the modified MD5 algorithm. *Universum: Tekhnicheskie Nauki [Universum: Technical Sciences]*, 114(9).
8. Goldberg, S. (1976). A direct attack on a birthday problem. *Mathematics Magazine*, 49(3), 130–132. <https://doi.org/10.2307/2690270>.
9. Shelevytskyi, I. V., Shutko, M. O., Shutko, V. M., & Kolganova, O. O. (2007). Splainy v tsyfrovii obrobtsi danykh i syhnaliv [Splines in digital data and signal processing].
10. Rivest, R. (1992). The MD5 Message-Digest Algorithm (RFC 1321). Internet Engineering Task Force (IETF). <https://doi.org/10.17487/RFC1321>.
11. Harasymchuk, O. I., & Maksymovych, V. M. (2003). Heheratory psevdovnykhnykh chysel, yikh zastosuvannia, klasyfikatsiia, osnovni metody pobudovy i otsinky yakosti [Generators of pseudorandom numbers, their application, classification, main methods of construction and quality assessment]. *Naukovo-tekhnichnyi zhurnal "Zakhyst informatsii" [Scientific and Technical Journal "Information Protection"]*, (3), 29–36.

Sahun Andrii

*PhD, Associate Professor of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-9203>

E-mail: a.sagun@nubip.edu.ua

Misiura Maksym

*PhD, Associate Professor of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9061-3462>

E-mail: mdm@nubip.edu.ua

Bilych Milana

bachelor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

E-mail: kib22-m.bilych@nubip.edu.ua

TECHNOLOGY FOR ANALYZING THE QUALITY OF HASH FUNCTION CHARACTERISTICS

Abstract. *The technology for analyzing the quality of a hash function is proposed. To test it, a specially developed hash function, which is a simplified analog of MD5, is used. It is shown that the traditional quality assessment of the obtained hash values based on the number of collisions has a significant drawback - high computational complexity. Therefore, the technology of quality assessment is reduced to the approximation of the analytical expression of the function, which is amenable to mathematical analysis by traditional methods applicable to polynomials. A better quality hash function is a hash function whose histogram is as close as possible to the graph of the function $y=x$. This will correspond to the Gaussian distribution of values. When using the proposed technology, it is necessary to develop criteria for classifying functions according to deviations from the ideal distribution of values by one or more of the following indicators: variance; mathematical expectation; arithmetic mean; geometric mean, etc.*

Keywords: *hash function, collisions, function interpolation, function approximation, quality of a hash function*

УДК 004.021:519.6:336.74

Ляхно Валерій Анатолійович*доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,**Національний університет біоресурсів та природокористування України*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9695-4543>E-mail: lva964@nubip.edu.ua**Касаткін Дмитро Юрійович***кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,**Національний університет біоресурсів та природокористування України*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2642-8908>E-mail: d.kasatkin@nubip.edu.ua**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СТРАТЕГІЇ АДАПТАЦІЇ В ПРОТИСТОЯННІ КРИПТОВАЛЮТ ТА КВАНТОВИХ КОМП'ЮТЕРІВ**

Анотація. Стаття присвячена дослідженню стійкості криптовалютних систем (КВС) в умовах нових загроз, пов'язаних із розвитком квантових обчислень. Діяльність представлена диференціальна ігрова модель, що дозволяє формалізувати взаємодія КВС і квантових комп'ютерів (КК), і навіть аналізувати їх взаємовплив. Методологія дослідження ґрунтується на застосуванні диференціальної теорії ігор для моделювання динаміки розподілу ресурсів між сторонами та оцінки їх стратегій в умовах невизначеності та конкуренції. У ході моделювання були розглянуті різні сценарії протистояння між КВС та квантовими обчисленнями, що дозволило виявити ключові закономірності та фактори, які суттєво впливають на ефективність криптографічного захисту, а також обчислювальні можливості атакуючих з використанням КК. Особливу увагу приділено аналізу різних методів захисту цифрових активів за умов можливих квантових загроз. Результати дослідження можуть бути основою для розробки нових стандартів криптографічної безпеки та адаптивних стратегій захисту, які будуть ефективними в умовах швидкого зростання обчислювальних потужностей квантових технологій.

Ключові слова: квантові обчислення, криптовалюти, криптографічна стійкість, математичне моделювання, ресурси розподілу, квантові загрози, стратегії захисту.

Вступ. Сучасні виклики в галузі інформаційної безпеки (далі ІБ), пов'язані з розвитком квантових обчислень, ставлять під загрозу стійкість криптографічних методів, що лежать в основі більшості цифрових систем, у тому числі криптовалют. Криптовалюти (далі КВ), згідно з [1], можуть стати особливо вразливими в умовах появи квантових комп'ютерів (далі КК), здатних виконувати обчислення, недоступні традиційним системам. Основна проблема полягає в тому, що квантові алгоритми, такі як алгоритм Шора [2, 3], можуть ефективно вирішувати задачі, на яких базуються асиметричні криптографічні схеми, наприклад, факторизацію цілих чисел і обчислення дискретного логарифму, що потенційно дозволить зловмисникам з використанням квантових обчислювальних потужностей обходити криптографічні. Виходячи з цього, дослідження в галузі моделювання взаємодії між КВ та КК є актуальним, оскільки воно дозволить спрогнозувати динаміку протистояння між технологіями захисту даних та загрозами, спричиненими розвитком квантових обчислень. І, зокрема, моделювання з використанням методів диференціальної теорії ігор надає унікальний інструмент для аналізу адаптивних стратегій сторін, які враховують обмеженість ресурсів та динамічну зміну параметрів системи. У таких моделях ресурси сторін можна класифікувати на кілька категорій, наприклад, для КВ це, перш за все, методи та засоби криптографічного захисту, що включають алгоритми шифрування, які є стійкими до атак. Сюди також входять ресурси, спрямовані на модернізацію криптографічних механізмів у відповідь нові загрози. Відповідно, для квантових обчислень ресурси включають обчислювальні потужності КК, а також інфраструктуру та дослідницькі зусилля, спрямовані на розвиток цієї технології.

Запропонована в роботі методика аналізу передбачає побудову математичної моделі, що описує взаємодію сторін, де КВ та КК виступають як гравці. Дана модель дозволяє формалізувати процеси розподілу ресурсів та прогнозувати результати протистояння з урахуванням різних сценаріїв. Вважаємо, що такий підхід може відкрити нові можливості для вироблення стратегій адаптації та захисту, спрямованих на мінімізацію ризиків, пов'язаних із квантовими загрозами для КВ.

Таким чином, виходячи з вище сказаного, дослідження проблеми стійкості криптовалютних систем в умовах квантових обчислень не тільки має теоретичну значимість, а й має високу практичну цінність, оскільки результати подібного аналізу можуть бути в подальшому використані для розробки нових стандартів криптографічної безпеки, створення протоколів захисту цифрових активів і формування довгострокової стратегії.

Огляд попередніх досліджень. В умовах стрімкого розвитку квантових обчислень [4, 5] посилюється необхідність у дослідженні механізмів протидії загрозам, пов'язаним із використанням КК для атак на існуючі криптографічні системи [6, 7]. Квантові алгоритми, такі як алгоритм Шора [8] та алгоритм Гровера [9], надають значні переваги у вирішенні завдань факторизації та пошуку, що ставить під загрозу безпеку традиційних криптографічних алгоритмів, таких як RSA, ECC та AES.

З іншого боку, розробка постквантових алгоритмів [10] та модернізація криптографічних систем, як було показано у роботах [8, 9-12], забезпечують активну протидію цим загрозам. Проте, динаміка протистояння між засобами захисту та атакуючими технологіями вимагає ретельного математичного моделювання, щоб передбачити поведінку обох сторін у різних сценаріях. Тому нові дослідження у цьому напрямі є релевантними.

Метою дослідження є розробка математичної моделі взаємодії криптовалютних систем та квантових комп'ютерів на основі диференціальної теорії ігор для аналізу динаміки розподілу ресурсів сторін та формування ефективних стратегій адаптації криптографічних механізмів до квантових загроз. При цьому об'єктом дослідження є криптографічні та обчислювальні системи, що взаємодіють в умовах розвитку квантових обчислень, з акцентом на криптовалютні платформи як найбільш уразливі до атаки з боку квантових комп'ютерів. Предметом дослідження є механізми розподілу ресурсів між сторонами (криптовалютами та квантовими комп'ютерами) у динамічній взаємодії, включаючи адаптивні стратегії захисту криптографічних систем та збільшення обчислювальних потужностей.

Методологія дослідження заснована на застосуванні диференціальної теорії ігор [13, 14] для моделювання взаємодії двох сторін – криптовалютних систем та квантових комп'ютерів (КК). Диференціальні ігри як розділ теорії оптимального управління дозволяють описувати динамічні процеси, де стратегічна поведінка учасників визначається зміною параметрів системи в часі. Використання запропонованої у роботі системи диференціальних рівнянь для опису стану ресурсів сторін забезпечує можливість обліку таких чинників, як обмеженість ресурсів, їх цілеспрямований розподіл та часові характеристики адаптації. У рамках побудованої моделі криптовалютні системи та КК розглядаються як гравці, які мають протилежні цілі. Для КВ метою є максимізація рівня захисту за рахунок застосування стійких криптографічних алгоритмів та модернізації механізмів безпеки. Для КК, своєю чергою, метою є досягнення обчислювальних потужностей, достатніх успішного обходу криптографічних бар'єрів.

Діяльність процес взаємодії сторін описується з допомогою набору функцій управління, що характеризують витрати ресурсів відповідні стратегії. Динаміка зміни параметрів представлена як системи звичайних диференціальних рівнянь, де кожна змінна моделі відбиває рівень ресурсів боку (наприклад, рівень криптографічного захисту, модернізаційні ресурси КВ, квантові обчислювальні потужності та ресурси інфраструктури). Для визначення оптимальних стратегій застосовуються методи чисельного аналізу та програмування, що дозволяють вивчати еволюцію системи у різних сценаріях. Візуалізація результатів обчислювальних експериментів проводилася з використанням засобів кібернетичного

моделювання, що дозволило інтерпретувати отримані залежності та виявляти ключові закономірності у протистоянні сторін.

Диференційна ігрова модель криптографічної стійкості до квантових загроз.

Для детального аналізу протистояння гравців необхідно розглянути ключові змінні, що описують активні засоби криптографічного захисту та квантових комп'ютерів, а також їх взаємний вплив.

Для криптовалют та квантових комп'ютерів визначимо змінні.

Для КВ:

Активні засоби КВ:

$z_1(t)$ – ефективність поточного криптографічного алгоритму;

$z_2(t)$ – ресурси модернізації (наприклад, перехід на постквантові алгоритми).

Активні засоби квантових комп'ютерів:

$z_3(t)$ – обчислювальна потужність квантового комп'ютера

$z_4(t)$ – ресурси підвищення обчислювальної потужності.

Активні засоби криптографічного захисту характеризують поточні та потенційні можливості систем криптографічного захисту у протидії загрозам, включаючи атаки квантових комп'ютерів. Вони описуються двома основними аспектами. Перший – це ефективність поточного криптографічного алгоритму. Ця змінна відбиває, наскільки стійкий існуючий криптографічний алгоритм атак, зокрема з використанням квантових обчислень. Наприклад, алгоритми RSA та ECC (еліптичні криві) демонструють високу стійкість до класичних атак, але вразливі для атак з використанням квантових комп'ютерів, таких як алгоритм Шора. Ефективність може бути виражена в бітах криптографічної стійкості, наприклад, 128-бітний AES вважається стійким до більшості атак, але його стійкість має бути переглянута в умовах квантової загрози. Якщо система використовує 256-бітний алгоритм AES для шифрування конфіденційних даних, ефективність алгоритму оцінюється за його здатністю запобігти атаці за заданий час при існуючих квантових обчислювальних потужностях. Другий аспект – це ресурси модернізації криптографічних алгоритмів. Дані ресурси включають витрати (тимчасові, обчислювальні, фінансові) на перехід до більш захищених криптографічних стандартів. Наприклад, впровадження постквантових алгоритмів, таких як алгоритми на основі ґрат (lattice-based cryptography), вимагатиме значних інвестицій у навчання фахівців, оновлення обладнання та модифікацію програмного забезпечення (ПЗ). Проілюструємо це невеликим прикладом. Скажімо, організація розглядає перехід на алгоритм CRYSTALS-Kyber, сертифікований NIST як постквантовий стандарт, це, відповідно, вимагатиме закупівлі нових апаратних модулів шифрування та оновлення протоколів зв'язку.

Аналогічна логіка міркувань справедлива й у активних коштів КК. Ці змінні описують можливості атакуючої сторони (наприклад, КК) здійснення обчислень, необхідні злому існуючих криптографічних алгоритмів. Тут також можна виділити два ключові аспекти. Перший аспект – це обчислювальна потужність КК. Ця змінна відображає поточний стан квантових обчислень, включаючи кількість кубітів та рівень їхньої когерентності. Таким чином, чим більше кубітів і вища їхня когерентність, тим більше можливостей для виконання складних обчислень, таких як факторизація великих чисел або пошук колізій у хеш-функціях. Наприклад, квантовий комп'ютер Google Sycamore з 53 кубітами в 2019 році досяг "квантової переваги", вирішивши завдання, недоступне для класичних комп'ютерів. Відповідно, КК із 1000 стабільними кубітами може провести факторизацію 2048-бітного ключа RSA за кілька годин, що неможливо для класичного комп'ютера в розумні терміни. Другий аспект – це ресурси підвищення обчислювальної потужності КК. Дані ресурси включають витрати на розробку потужніших КК, такі як фінансування досліджень, поліпшення технологій охолодження зниження рівня шуму, а також оптимізація квантових алгоритмів. Так, наприклад, створення кубітів на основі надпровідників вимагатиме значних матеріальних та енергетичних витрат. А інвестиції компанії у створення нового покоління кубітів дозволять підвищити обчислювальну потужність системи з 256 до 512 кубітів, що призведе до різкого збільшення можливостей атаки.

Тоді система диференціальних рівнянь виглядатиме так:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= -p_{41}z_4v_1 + c_1, \\ \dot{z}_2 &= -p_{42}z_4v_2 + c_2, \\ \dot{z}_3 &= -p_{23}z_2u_1 + c_3, \\ \dot{z}_4 &= -p_{24}z_2u_2 + c_4, \end{aligned}$$

де p_{ij} – ефективність засобів однієї сторони проти іншої (для аналізованої моделі описує, наскільки успішно ресурси і стратегії однієї сторони (наприклад, криптовалютні системи або КК) можуть протидіяти зусиллям протилежної сторони. Для КК це може бути, наприклад, рівень стійкості криптографічних алгоритмів до злому з боку квантових комп'ютерів, який виражається через ймовірність успішного показу, що характеризує здатність їх алгоритмів та обчислювальних потужностей долати існуючі криптографічні захисти);

u_1, u_2, v_1, v_2 – частки ресурсів, що направляються на відповідні цілі (являють собою пропорції загального обсягу доступних ресурсів кожної зі сторін (наприклад, криптовалютних систем або КК, які виділяються для виконання конкретних завдань або стратегій у процесі їх взаємодії. Для криптовалют частки ресурсів можуть включати, зокрема, питомий обсяг, спрямований на підтримку поточних криптографів). також, ресурси, виділені на розробку і впровадження постквантових криптографічних стандартів, які зможуть протистояти атакам з боку КК. 1 (або 100%), оскільки ресурси обмежені, та їх розподіл між різними завданнями потребує оптимізації в рамках окремого завдання);

c_1, c_2, c_3, c_4 – можливості поповнення ресурсів (тобто здатність сторін збільшувати обсяг доступних ресурсів, необхідних для виконання їх стратегічних завдань. Дані ресурси можуть включати фінансові, технічні, обчислювальні або кадрові засоби, які забезпечують стійкість або розвиток сторін в умовах протистояння. Наприклад, для КВ можливості поповнення ресурсів відображають інвестиції в розробку нових криптографічних для інтеграції більш захищених протоколів, тощо. Для КК можливості поповнення ресурсів включають розвиток квантових технологій, таких як збільшення числа кубітів або підвищення їх когерентності, а також фінансування наукових досліджень для оптимізації квантових алгоритмів (наприклад, для прискорення роботи алгоритму Шора) тощо.

Тоді функцію виграшу сторін можна записати так.

Для криптовалют :

$$J_A = [z_1(T) - z_3(T)].$$

Мета криптовалют (КВ) – мінімізувати втрати своїх криптографічних засобів і максимізувати шкоду, нанесену обчислювальним засобам КК.

Для квантових комп'ютерів (КК):

$$J_B = [z_3(T) - z_1(T)].$$

Мета КК – максимізувати ефективність своїх обчислень та мінімізувати збитки від контрзаходів КВ.

Модель описує диференціальну гру з нульовою сумою, де динамічна взаємодія сторін та рівновага визначаються через оптимальні стратегії розподілу ресурсів. Зауважимо, що аналітичне рішення може бути недоступним, тому буде використано ітераційний процес для пошуку рівноважного стану, а алгоритм побудови може ґрунтуватися на принципі максимуму Л.С. Понтрягіна [14].

Результати дослідження та їх обговорення. Основне завдання обчислювального експерименту (ВЕ), результати якого показано на рис. 1, полягала в тому, щоб оцінити динамічну взаємодію сторін і відповісти на запитання: «Як криптовалюти адаптують свої захисні механізми у відповідь на атаки КК, і як КК посилюють свої обчислювальні потужності для подолання цих захистів?». Крім того, необхідно в ході ВЕ визначити ключові залежності

та виявити, які фактори, зокрема, ресурси модернізації криптографії або обчислювальні потужності КК) мають найбільший вплив на результат протистояння.

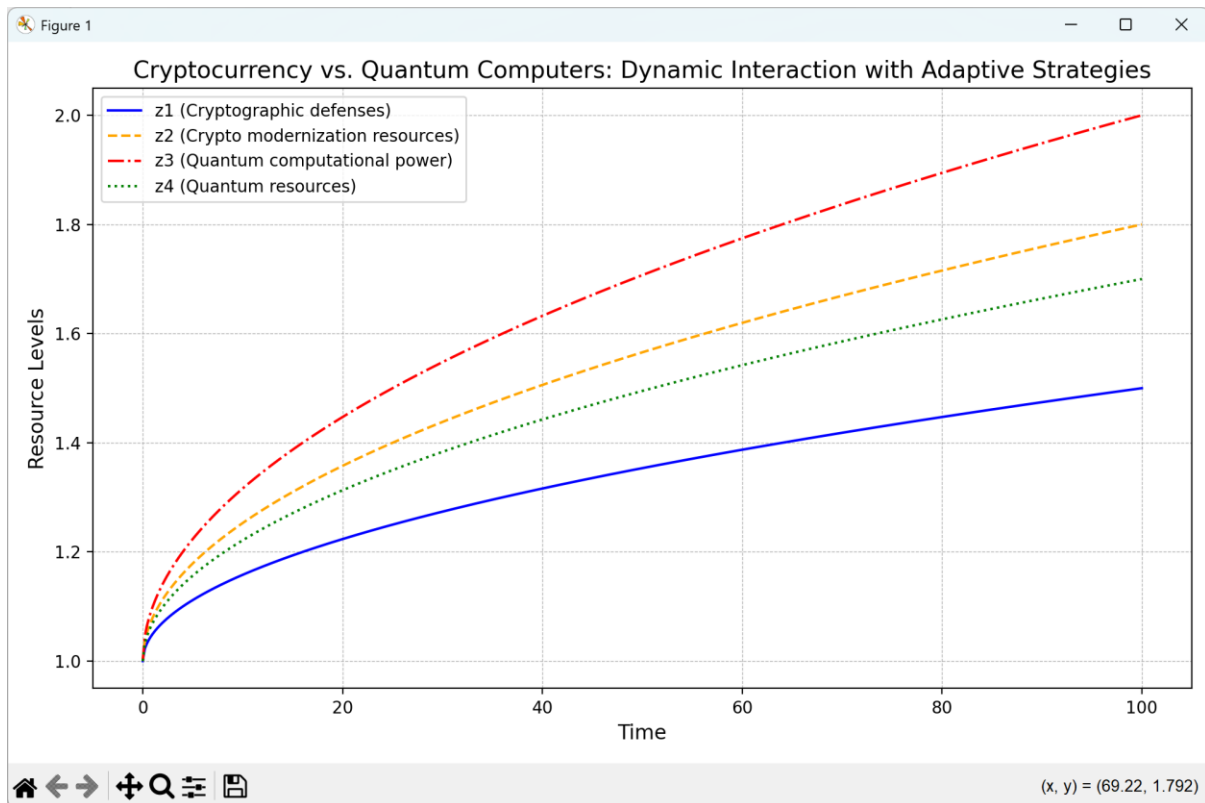


Рисунок 1 – Динаміка зміни ресурсів криптографічної системи та квантових обчислень в умовах протистояння

Експеримент включав завдання початкових значень змінних (наприклад, спочатку високий рівень криптографічного захисту $z_1(0)$ та обчислювальних потужностей $z_3(0)$). Сценарії розподілу ресурсів, тобто тестування різних стратегій сторін, таких як максимальна концентрація ресурсів на одному напрямку, наприклад, КК повністю фокусується на збільшенні потужності, а КВ – на ефективності засобів однієї сторони проти іншої, що дозволяє оцінювати реальну загрозу та ступінь протидії.

Результати експерименту загалом дозволяють зрозуміти динаміку взаємодії сторін, і визначити ключові чинники, які впливають на стійкість криптовалютних систем, що у подальших дослідженнях дасть змогу розробити конкретні практичні рекомендації щодо оптимального розподілу ресурсів та впровадження адаптивних стратегій захисту за умов квантових загроз для КВ.

Результати моделювання представлені рис. 1 як тимчасових залежностей рівнів ресурсів сторін, що у протистоянні, тобто, відповідно, криптовалютні технології і квантових обчислень. На графіках відображено зміни чотирьох ключових змінних: криптографічних захистів $z_1(t)$, ресурсів модернізації криптографії $z_2(t)$, обчислювальних потужностей квантових комп'ютерів $z_3(t)$ та їх ресурсів $z_4(t)$. Графік криптографічних захистів $z_1(t)$ показує, як рівень стійкості КВ змінюється під впливом атак із боку квантових комп'ютерів. На початкових етапах протистояння помітно зниження значень $z_1(t)$, що з активними діями боку квантових технологій, реалізують атакуючі стратегії із високим рівнем пріоритету. Однак наявність ресурсів модернізації криптографії $z_2(t)$ дозволяє компенсувати втрати, що призводить до стабілізації або навіть зростання $z_1(t)$ в більш пізні періоди.

Динаміка ресурсів модернізації $z_2(t)$ демонструє їхню критичну роль у протистоянні. На початкових етапах спостерігається поступове зниження $z_2(t)$ через перерозподіл коштів на

відновлення та захист криптографічних систем. Однак заповнення ресурсів, описане в моделі, дозволяє підтримувати $z_2(t)$ на рівні, достатньому для ефективної стратегії, що протидіє.

Зміни обчислювальних потужностей квантових комп'ютерів $z_3(t)$ відображають їхню високу початкову ефективність, яка поступово знижується під впливом атак з боку криптовалютної технології. Ця динаміка ілюструє ефективність адаптивних стратегій криптовалютного боку, вкладених у послаблення можливостей атакуючої сторони.

Ресурси квантових комп'ютерів $z_4(t)$ характеризуються аналогічною динамікою. Їхнє використання для атакуючих дій призводить до поступового виснаження, проте заповнення ресурсів дозволяє сторонам підтримувати активність протягом усього періоду моделювання.

Таким чином, отримані результати демонструють складну взаємодію сторін із змінним ступенем домінування залежно від застосовуваних стратегій та заповнення ресурсів, а також підтверджують, що адаптивні стратегії, що залежать від поточного стану системи, можуть значно вплинути на результат протистояння та забезпечити динамічну рівновагу між сторонами.

Висновки. Проведене дослідження продемонструвало, що розвиток квантових обчислень створює значні ризики для безпеки криптовалютних систем, оскільки квантові алгоритми, такі як алгоритм Шора можуть ефективно обходити існуючі криптографічні механізми. Запропонована в рамках роботи диференціальна ігрова модель показала, що динаміка протистояння між криптовалютами та квантовими комп'ютерами визначається стратегіями розподілу ресурсів сторін. Ключовим висновком є підтвердження ефективності адаптивних стратегій, які дозволять мінімізувати втрати криптографічної стійкості та уповільнити розвиток обчислювальних потужностей атакуючої сторони. Отримані в ході обчислювальних експериментів результати наголошують на необхідності впровадження постквантових криптографічних алгоритмів та модернізації інфраструктури для підвищення стійкості цифрових систем. А, крім того, запропонована методологія, на основі розвитку моделей, побудованих з використанням апарату диференціальних ігор, може бути використана для прогнозування довгострокових сценаріїв розвитку квантових загроз та вироблення превентивних заходів.

Список використаних джерел

1. Osipovich, A. (2024). A looming threat to Bitcoin: The risk of a quantum hack. *The Wall Street Journal*. <https://www.wsj.com/tech/cybersecurity/a-looming-threat-to-bitcoin-the-risk-of-a-quantum-hack-24637e29>
2. Horbenko, I. D., Kuznietsov, O. O., Potii, O. V., Horbenko, Yu. I., Hanzia, R. S., & Ponomar, V. A. (2016). Postkvantova kryptohrafiia ta mekhanizmy yii realizatsii [Post-quantum cryptography and its implementation mechanisms]. *Radiotekhnika [Radio Engineering]*, (186), 32–52.
3. Potii, O. V., & Isirova, K. V. (2017). Analiz vymoh ta modelei bezpeky dlia postkvantovoi kryptohrafii [Analysis of requirements and security models for post-quantum cryptography]. *Matematychni ta kompiuterne modeliuvannia. Serii: Tekhnichni nauki [Mathematical and Computer Modeling. Series: Technical Sciences]*, (16), 192–197.
4. Holmes, S., & Chen, L. (2021). Assessment of quantum threat to bitcoin and derived cryptocurrencies (Report 2021/190). *Cryptology ePrint Archive*. <https://eprint.iacr.org/2021/190>
5. Ostrianska, Y. V., Yesina, M. V., & Gorbenko, I. D. (2022). Analiz pohliadiv Yevropeiskoho soiuzu na kvantovo- postkvantovi obmezhenia [Analysis of the European Union's views on quantum and post-quantum constraints]. *Radiotekhnika [Radio Engineering]*, (210), 87–98.
6. Denker, K., & Javaid, A. Y. (2019). Quantum computing as a threat to modern cryptography techniques. In *Proceedings of the International Conference on Pharmaceutical Sciences (FCS)* (pp. 3–8). The Steering Committee of World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing.
7. Khodaiemehr, H., Bagheri, K., & Feng, C. (2023). Navigating the quantum computing threat landscape for blockchains: A comprehensive survey. *Authorea*.

8. Raheman, F. (2024). Futureproofing blockchain & cryptocurrencies based on evolving vulnerabilities & Q-Day threat with quantum-safe ledger technology (QLT). *Journal of Computer and Communications*, 12(7), 59–77. <https://doi.org/10.4236/jcc.2024.127005>
9. Weinberg, A. I., & Faccia, A. (2024). Quantum algorithms: New frontier in financial crime prevention. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2403.18322>
10. Gupta, K. D., Nag, A. K., Rahman, M. L., Mahmud, M. P., & Sadman, N. (2021). Using computational complexity to protect cryptocurrency against quantum threats: A review. *IT Professional*, 23(5), 50–55. <https://doi.org/10.1109/MITP.2021.3106233>
11. Naik, A., Yeniaras, E., Hellstern, G., Prasad, G., & Vishwakarma, S. K. L. P. (2023). From portfolio optimization to quantum blockchain and security: A systematic review of quantum computing in finance. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2307.01155>
12. Szatmáry, S. (2022). Quantum computers—security threats and solutions. In D. Kreps, S. M. T. Wong, K. Komukai, T. V. Gopal, & K. C. Lau (Eds.), *Human choice and computers* (pp. 431–441). Springer.
13. Pontryagin, L. S. (1965). On some differential games. *Journal of Society for Industrial and Applied Mathematics, Series A: Control*, 3(1), 49–52.
14. Pontryagin, L. S. (2018). *Mathematical theory of optimal processes*. Routledge. <https://doi.org/10.1201/>

Lakhno Valeriy

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Computer systems, networks and cybersecurity,

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9695-4543>

E-mail: lva964@nubip.edu.ua

Kasatkin Dmytro

PhD, Associate Professor, Head of the Department of Computer systems, networks and cybersecurity,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2642-8908>

E-mail: d.kasatkin@nubip.edu.ua

MATHEMATICAL MODELING AND ADAPTATION STRATEGIES IN THE CONFRONTATION BETWEEN CRYPTOCURRENCIES AND QUANTUM COMPUTERS

Abstract. *This article is dedicated to studying the resilience of cryptocurrency systems (CCS) under new threats associated with the development of quantum computing. A differential game model is introduced, allowing for the formalization of the interaction between CCS and quantum computers (QC), as well as the analysis of their mutual influence. The research methodology is based on the application of differential game theory to model the dynamics of resource allocation between the parties and to evaluate their strategies under conditions of uncertainty and competition. Various scenarios of confrontation between CCS and quantum computing were considered during the modeling process, which made it possible to identify key patterns and factors that significantly affect the effectiveness of cryptographic protection, as well as the computational capabilities of attackers utilizing QCs. Special attention is given to the analysis of different methods for protecting digital assets under potential quantum threats. The results of the study may serve as a foundation for developing new cryptographic security standards and adaptive protection strategies that will remain effective amid the rapid growth of quantum computing capabilities.*

Keywords: *quantum computing, cryptocurrencies, cryptographic resilience, mathematical modeling, resource allocation, quantum threats, protection strategies.*