

Міністерство освіти і науки України

Системні технології

System technologies

2 (157) 2025

Регіональний міжвузівський збірник наукових праць

Засновано у січні 1997 року.

У випуску:

- ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ОРГАНІЗАЦІЯ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА
- МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ
- СИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ
ТА КІБЕРБЕЗПЕКА

Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. –
Випуск 2 (157). - Дніпро, 2025. – 225 с.
ISSN 1562-9945 (Print).
ISSN 2707-7977 (Online).

Редакційна колегія випуску:

Алпатов А.П. - д.т.н., проф. (відп. редактор)
Архипов О.Є. - д.т.н., проф.
Білозьоров В.Є. - д.ф.-м.н., проф.
Бабічев С.А. (Чеська Республіка) - д.т.н., доц.
Єрьомін О.О. - д.т.н., проф.

Прогресивні інформаційні
технології та організація
сучасного виробництва

Гече Ф.Е. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гуда А.І. - д.т.н., проф.
Гнатушенко Вік.В. - д.т.н., проф.
Кіріченко Л.О. - д.т.н., проф.

Математичне
та програмне забезпечення
інтелектуальних систем

Гнатушенко В.В. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гожий О.П. - д.т.н., проф.
Светличний Д.С. (Польща) - д.т.н., проф.
Хандецький В.С. - д.т.н., проф.

Системні технології обробки
інформації
та кібербезпека

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Українського державного університету науки і технологій
від 29.01.2025 р., № 7

Адреса редакції: 49600, Дніпро, пр. Науки, 4
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»
кафедра Інформаційних технологій та систем.
Тел. +38(097)6854525
E-mail: st@nmetau.edu.ua
<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

© Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,
ІВК «Системні технології», 2025

DRONE VIDEO PROCESSING BY FRAGMENT ANALYSIS

Annotation. This study focused on analyzing drone video to address the inherent complexity of processing videos captured with a moving camera. Each frame is divided into smaller fragments through a grid-based segmentation technique, enabling a localized and detailed motion analysis. Singular Value Decomposition (SVD) is applied to compute the Ky Fan norm for each fragment, enabling the detection of dynamic changes between consecutive frames. The fragment-level analysis allows the algorithm to robustly identify regions of interest and differentiate between global motion (camera movement) and local motion (object movement) despite challenges introduced by camera instability. The motion state is classified into four categories: stable camera with no object movement, stable camera with object movement, moving camera with no object movement, and moving camera with object movement. This fragment-based methodology enhances precision in dynamic scene analysis, offering a scalable and efficient solution for applications such as video stabilization, object tracking, and real-time motion detection in complex environments.

Key words Video stream fragmentation; Ky Fan norm; Singular value decomposition; Drones, Object detection; Moving camera; Data Analysis, Video processing

Statement of the problem. Drones, also known as Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), have become invaluable tools in various fields, including agriculture, ensuring the safety of construction workers, environmental monitoring, disaster response, surveillance [1,2], and military applications. Their true potential lies in their ability to analyze their surroundings and make intelligent decisions. This is made possible by integrating computer vision algorithms into drones, enabling them to perform various tasks based on real-time camera feeds [3,4]. A lot of drone frameworks presented in the last researches [5,6,7]

Many of these algorithms inherently rely on a moving camera [8]. For instance, in intelligent video surveillance systems, camera movement techniques such as pan-tilt-zoom (PTZ) enhance focus and track targets [9]. Recent advancements in drone technology, particularly the availability of relatively inexpensive drones with advanced imaging capabilities, promise significant commercial applications in the future [10]. These drones can operate with varying levels of movement and autonomy.

Additionally, the progress in smartphone camera technology has fueled interest among consumers in capturing video sequences capable of detecting and tracking moving objects [11]. These cameras often operate with unrestricted movement. Even in outdoor scenes

captured by a fixed camera, the environment's dynamic nature may cause the camera to jitter or shake, preventing the camera from being considered entirely stationary [12].

As the use of moving cameras becomes more widespread and interest in detecting moving objects grows, developing robust methods for moving object detection in dynamic environments becomes increasingly essential.

Analysis of the latest research and publications. In the case of a fixed camera, the changes between consecutive frames are typically caused by moving objects. However, not all these changes relate to the objects of interest or the intended application. For indoor scenes, even in controlled environments, unwanted factors like shadows or changes in lighting conditions can interfere with the detection of moving objects [13]. In outdoor scenes, where the environment is usually uncontrollable, issues such as branch movements, cloud motion, and illumination variations can pose significant challenges for moving object detection [14].

Previous research [15,16] has addressed the problem of detecting moving objects in video sequences captured by fixed cameras, with or without such disturbances. The key idea involves building a stable background model and applying a background subtraction technique, where the current frame is subtracted from the background to detect moving objects.

For moving cameras, the detection method has to address the challenges faced by fixed cameras and account for difficulties related to compensating for camera motion. A simple background subtraction with a basic motion compensation model is insufficient for moving cameras. Inaccuracies in motion compensation, likely in free camera movements, lead to failures in building a reliable background model that distinguishes between background and foreground pixels.

One approach to detecting moving objects with a moving camera is to differentiate the motion caused by the camera from that of the moving objects. Solutions generally fall into two categories: background modeling and trajectory classification. Background modeling [17] uses motion compensation to construct a suitable background for each frame. At the same time, trajectory classification [19,18] calculates long-term trajectories for feature points using a tracker and applies clustering techniques to distinguish object-related trajectories from background movement.

Another strategy is to extend background subtraction methods based on low-rank and sparse matrix decomposition, initially developed for static cameras [20,21], to handle moving cameras [22]. The core idea is that coherent information across image frames is captured in a low-rank representation, while outliers—such as moving objects—appear in the sparse representation. However, this assumption relies on a static background across frames. To adapt this approach to moving cameras, a transformation can be incorporated to compensate for background motion, such as affine transformations for pan-tilt-zoom motions or perspective transformations for free camera movements [23].

Object tracking can also serve as a method for detecting moving objects, although its primary goal differs. In tracking, a target object is identified in the initial frame, and its location is updated in subsequent frames. This involves extracting features like color, texture, or

statistical information from the target and using a similarity model or classifier to find the best match in the next frame. The target's characteristics are then updated for continued tracking.

An alternative approach is fragment processing. The fragment-based analysis offers a promising approach to address these challenges by dividing video frames into smaller, meaningful regions or fragments for localized and robust object detection. Fragment processing is a broad concept. The approach defines fragments as groups of pixels with similar color or texture properties, simplifying the image into coherent regions for analysis [24]. Or the fragment can be the video frame geometry part. Fragments are defined as video frame geometric parts represented as matrices with arbitrary dimensions. The method significantly reduces computational costs by skipping traditional transformation steps like matrix vectorization. Reducing the load of the drone processor allows not only to optimize data processing but also to reduce the load on the power system. In the research [25], SVD (Singular value decomposition) of the matrix and the Ky Fan norm are proposed for scene change analysis. In the context of motion detection, this approach was expanded [26]. Dividing the frame into 5x5 or 10x10 allowed identify the fragments in which motion occurred. An analysis of the effectiveness of the obtained descriptor across various video data sizes demonstrates that changes in the descriptor for each fragment are independent of both the video resolution and aspect ratio. [27]. The rectangle frame has been transformed into a square matrix by SVD, where each element is a Ky Fan norm value used as an object detection descriptor. The fragments number is changing the analysis scale. In research [28], dividing the frame into 100x100 detected contour moving objects.

The Singular Value Decomposition (SVD) for $m \times n$ matrix A is a factorization of the form

$$A = USV^* \quad (1)$$

where U is an $m \times m$ complex unitary matrix, S is an $m \times n$ diagonal matrix with non-negative real numbers on the diagonal, and V is an $n \times n$ complex unitary matrix. If A is real, U and V can be guaranteed to be also real orthogonal matrices.

The SVD is closely associated with several common matrix norms and offers an efficient method for their computation. This relationship is derived from the foundational existence proof for the SVD, which establishes its applicability

$$\|A\|_2 = (\rho(A * A))^{1/2} = \sigma_1(A) \quad (2)$$

It follows from our existence the sum first k singular values:

$$\|A\|_k^{KF} = \sigma_1(A) + \dots + \sigma_k(A) \quad (3)$$

is a matrix norm, called the Ky Fan k -norm. In our approach, the Ki Fan norm is a fragment descriptor. There is no need to do a full SVD transformation to obtain the norm value. It is enough to obtain a matrix of singular values. The numpy library function `linalg.svdvals` returns the singular values of a matrix (or a stack of matrices) x . When x is a stack of matrices, the function will compute the singular values for each matrix in the stack.

Objective. The purpose of this study is to develop an efficient and robust algorithm for detecting and differentiating between camera motion and object movement within video frames. By leveraging grid-based frame segmentation and Singular Value Decomposition

(SVD) to compute Ky Fan norms, the algorithm identifies dynamic fragments and classifies global (camera) and local (object) motion. This enables accurate motion state assessment, offering insights into the stability of the camera and the activity of objects within the scene.

Presentation of the main material of the research. In this section, we will consider the results produced by the developed application. Our experiment used a drone video camera. Codec is h264, frame size is 1920.x1080, frame rate is 30. The camera position is unstable. To visualize the results of utilizing the Ky Fan norm for video analysis, a Python 3.10.11 application was developed and executed on a system equipped with an Intel Core i5 processor, 16 GB of RAM, and running the Windows operating system. The application relies on two open-source libraries licensed under Apache License: OpenCV version 4.10.0 and NumPy version 2.2.1.

We treat the video as a sequence of frames (Fig. 1). Each frame is converted from RGB to a grayscale model, and a Gaussian blur filter is applied so that the value of each pixel carries only intensity information.



Figure 1 - Video source as a sequence of frames. Source: compiled by the authors

Each frame is divided into $G = (n \times m)$ rectangular fragments. For each fragment g_{ij} , its spatial coordinates are determined, and the intensity matrix of its pixels is extracted. The obtained matrix fragment, having an appropriate size for SVD transformation, undergoes singular value decomposition, allowing the calculation of singular values. The Ky Fan norm is then determined for each fragment. The rectangle frame has been transformed into a square matrix 5×5 by SVD where each element is Ky Fan norm value as a descriptor. The difference in norms between the two frames is calculated as:

$$\Delta_{ij} = |\sigma_{ij}^{t+1} - \sigma_{ij}^t| \quad (4)$$

A fragment g_{ij} is marked as dynamic if:

$$\Delta_{ij} > T_{motion} \quad (5)$$

The global mean change across all fragments is calculated as

$$\Delta_{global} = (1/|G|) \sum \Delta_{ij} \quad (6)$$

If more than 80% of fragments have

$$\Delta_{ij} < T_{motion} / 2 \quad (7)$$

the camera is considered stable:

$$\frac{|g_{ij}: \Delta_{ij} < \frac{T_{motion}}{2}|}{|G|} > 0.8 \quad (8)$$

Local movement is detected if more than 20% of fragments have

$$\Delta_{ij} > T_{motion} \quad (9)$$

$$\frac{|g_{ij}: \Delta_{ij} > T_{motion}|}{|G|} > 0.2 \quad (10)$$

Based on the global and local motion analyses, the algorithm determines one of four possible states:

- Stable Camera, No Object Movement
- Stable Camera, Object Moving
- Moving Camera, No Object Movement
- Moving Camera, Object Moving

We selected fragment (2,3) for the result demonstration in details. 2 is Y, 3 is X indexes of the 5x5 matrix. Fragment (2,3) is marked by a white spot (Fig. 2). The camera and object state are on the top side. Fragment with moving object marked by white spot. On frame number 29, the Ky Fan norm value exceeds the threshold, and moving objects have been detected. This zoomed-in block can illustrate the result better.

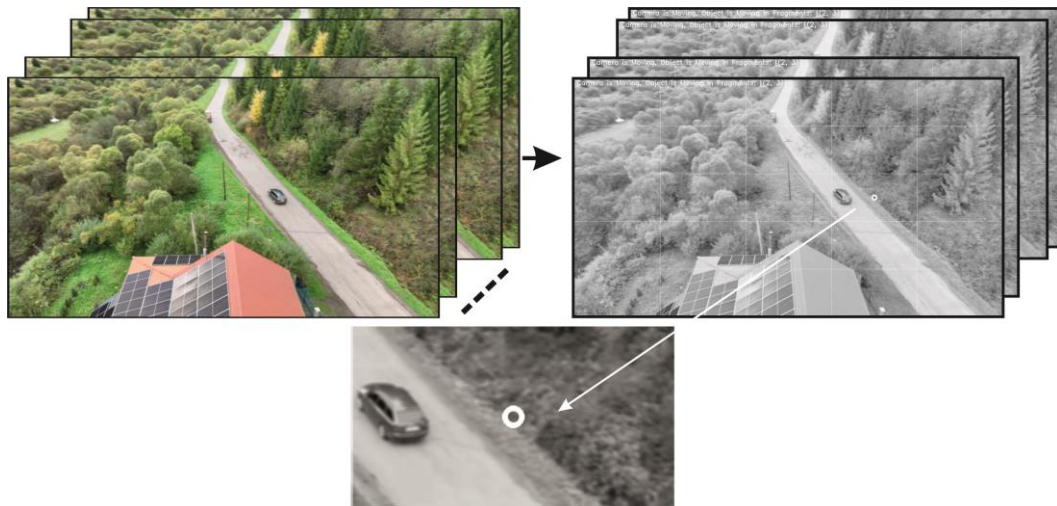


Figure 2 - The result of frame-by-frame processing is a new video source in a grayscale model. The camera and object state are on the top side. Fragment with moving object marked by white spot. Source: compiled by the authors

The drone's flight was smooth, with brief hangs. The camera is considered stable if the deviation is less than the threshold value for more than 80% of the fragments. Ky-Fan norm fluctuations for all fragments are presented in Fig.3 A. Local motion was defined for frag-

ments with significant changes. Fig.3 B presents Ky-Form fluctuation for the fragment (2,3). On frame number 29, the Ky Fan norm value exceeds the threshold, and moving objects have been detected. A comparison of the norm fluctuations in all fragments shows a significant deviation for the fragment (2,3). This indicates the local movement of the object in the fragment. The smooth movement of the drone leads to uniform changes in the normal fluctuations of Ky Fan in all fragments, which can be labeled as a "moving camera." A significant deviation of the norm fluctuations in the segment indicates the local movement of the object.

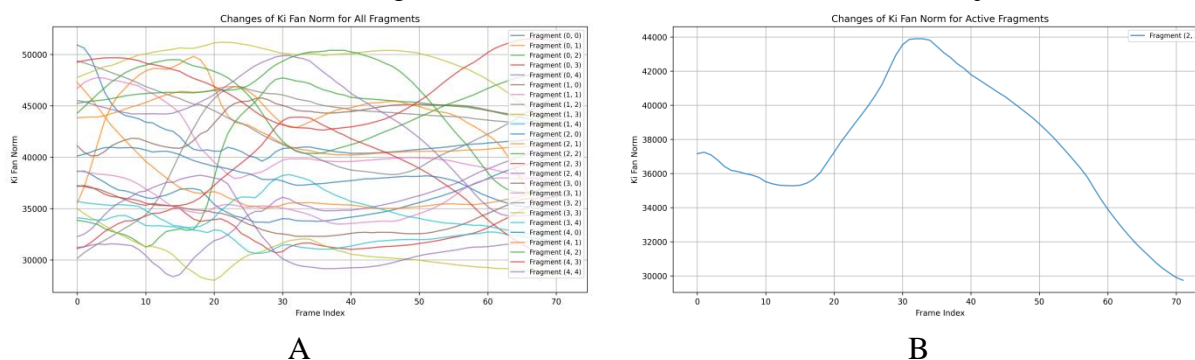


Figure 3 - Ky-Fan norm fluctuation for all fragments A. Ky-Fan norm fluctuation for fragment (2,3). B presents Ky-Form fluctuation for the fragment (2,3). On frame number 29, the Ky Fan norm value exceeds the threshold, and moving objects have been detected. Y is Ky Fan norm value, X is frame numbers. Source: compiled by the authors

Conclusions. The study introduces an approach for processing drone video footage, analyzing dynamic changes in frames captured by a moving camera. The method achieves localized motion analysis by segmenting video frames into smaller fragments through a grid-based technique. Singular Value Decomposition (SVD) is employed to compute the Ki Fan norm for each fragment, enabling the detection of both global (camera) and local (object) motion. The methodology aims to support applications such as video stabilization, object tracking, and dynamic scene analysis.

LITERATURE / REFERENCES

1. Madhavan, R., Silva, T., Farina, F., Wiebbelling, R., Renner, L., & Prestes, E. (2018). Unmanned aerial vehicles for environmental monitoring, ecological conservation, and disaster management. In *Technologies for Development: From Innovation to Social Impact* (pp. 31-39). Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-91068-0_3
2. Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Y., Alsharif, M. H., & Khan, M. A. (2023). Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intelligent Service Robotics*, 16(1), 109-137. DOI: 10.1007/s11370-022-00452-4
3. Akbari, Y., Almaadeed, N., Al-Maadeed, S., & Elharrouss, O. (2021). Applications, databases and open computer vision research from drone videos and images: a survey. *Artificial Intelligence Review*, 54, 3887-3938. DOI: 10.1007/s10462-020-09943-1

4. Arafat, M.Y., Alam, M.M., & Moh, S. (2023). Vision-based navigation techniques for unmanned aerial vehicles: Review and challenges. *Drones*, 7(2), 89. DOI: 10.3390/drones7020089
5. Heakl, A., Youssef, F., Parque, V., & Goma, W. (2024). DroneVis: Versatile Computer Vision Library for Drones. *arXiv preprint arXiv:2406.00447*. DOI: 10.48550/arXiv.2406.00447
6. Rohan, A., Rabah, M., & Kim, S. H. (2019). Convolutional neural network-based real-time object detection and tracking for parrot AR drone 2. *IEEE access*, 7, 69575-69584. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919332
7. Han, S., Shen, W., & Liu, Z. (2016). Deep drone: Object detection and tracking for smart drones on embedded system. URL https://web.stanford.edu/class/cs231a/prev_projects_2016/deepdrone-object_2_.pdf.
8. Yazdi, M., & Bouwmans, T. (2018). New trends on moving object detection in video images captured by a moving camera: A survey. *Computer science review*, 28, 157-177. DOI: 10.1016/j.cosrev.2018.03.001
9. Yang, J., Xie, X., & Wang, Y. (2017, April). Design of video surveillance and tracking system based on attitude and heading reference system and PTZ camera. In *2017 5th International Conference on Computer-Aided Design, Manufacturing, Modeling and Simulation (CDMMS 2017)* (Vol. 1834, No. 1, p. 040016). DOI: 10.1063/1.4981612
10. Chen, P., Dang, Y., Liang, R., Zhu, W., & He, X. (2017). Real-time object tracking on a drone with multi-inertial sensing data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(1), 131-139. doi: 10.1109/TITS.2017.2750091
11. Dames, P., Tokekar, P., & Kumar, V. (2017). Detecting, localizing, and tracking an unknown number of moving targets using a team of mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*, 36(13-14), 1540-1553. DOI: 10.1177/0278364917709507
13. Leal-Taixé, L., Milan, A., Schindler, K., Cremers, D., Reid, I., & Roth, S. (2017). Tracking the trackers: an analysis of the state of the art in multiple object tracking. *arXiv preprint arXiv:1704.02781*. DOI: 10.48550/arXiv.1704.02781
14. Risse, B., Mangan, M., Del Pero, L., & Webb, B. (2017). Visual tracking of small animals in cluttered natural environments using a freely moving camera. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision workshops* (pp. 2840-2849). https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2017_workshops/papers/w41/Risse_Visual_Tracking_of_ICCV_2017_paper.pdf
15. Bouwmans, T. (2014). Traditional and recent approaches in background modeling for foreground detection: An overview. *Computer science review*, 11, 31-66. DOI: 10.1016/j.cosrev.2014.04.001
16. Yilmaz, A., Javed, O., & Shah, M. (2006). Object tracking: A survey. *Acm computing surveys (CSUR)*, 38(4), 13-es. DOI: 10.1145/1177352.1177355
17. Wren, C. R., Azarbayejani, A., Darrell, T., & Pentland, A. P. (1997). Pfunder: Real-time tracking of the human body. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 19(7), 780-785. doi: 10.1109/34.598236

18. Zhai, W., Xiong, X., Mo, G., Xiao, Y., Wu, C., Xu, Z., & Pan, J. (2024). A Bagging-SVM field-road trajectory classification model based on feature enhancement. *Computers and Electronics in Agriculture*, 217, 108635. DOI: 10.1016/j.compag.2024.108635
19. Zhai, W., Xu, Z., Pan, J., Guo, Z., & Wu, C. (2024). A general image classification model for agricultural machinery trajectory mode recognition. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227, 109629. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109629
20. Bouwmans, T., Sobral, A., Javed, S., Jung, S. K., & Zahzah, E. H. (2017). Decomposition into low-rank plus additive matrices for background/foreground separation: A review for a comparative evaluation with a large-scale dataset. *Computer Science Review*, 23, 1-71. DOI: 10.1016/j.cosrev.2016.11.001
21. T. Bouwmans, T., Aybat, N. S., & Zahzah, E. H. (Eds.). (2016). *Handbook of robust low-rank and sparse matrix decomposition: Applications in image and video processing*. CRC Press. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/2994445>
22. Ebadi, S. E., Ones, V. G., & Izquierdo, E. (2015, September). Efficient background subtraction with low-rank and sparse matrix decomposition. In *2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)* (pp. 4863-4867). IEEE. doi: 10.1109/ICIP.2015.7351731.
23. Wu, Y., He, X., & Nguyen, T. Q. (2015). Moving object detection with a freely moving camera via background motion subtraction. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 27(2), 236-248. doi: 10.1109/TCSVT.2015.2493499
24. Tomasi, C. (2012). Histograms of oriented gradients. *Computer Vision Sampler*, 1-6.
25. Koliada, M. "Ky fan norm application for video segmentation". *Herald of Advanced Information Technology*, 2020;1(3), 345-351. DOI: 10.15276/hait.01.2020.1
26. Mashtalir, S., & Lendel, D. "Video pre-motion detection by fragment processing". CEUR Workshop Proceedings Volume. 2024; 3790, pp. 342 – 351. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85207837522&partnerID=40&md5=26529ee16efb141face273bd943660d5>
27. Mashtalir, S. V. & Lendel D. P. "Video fragment processing by Ky Fan norm", *Appl. Asp. Inf. Technol.* 2024; 7.1: 59-68. DOI: DOI: 10.15276/aait.07.2024.5
28. Sergii V. Mashtalir, Dmytro P. Lendel (2024). Moving object shape detection by fragment processing. *Herald of Advanced Information Technology*. 7(4), 414-423. DOI: 10.15276/hait.07.2024.30

Received 26.02.2025.
Accepted 28.02.2025.

Обробка відео з дронів шляхом фрагментного аналізу

В цьому дослідженні ми зосередилися на аналізі відео з дронів для вирішення задачі обробки фрагментів відео, знятих рухомою камерою. Кожен кадр розділений на менші фрагменти за допомогою методу сегментації на основі сітки, що дає змогу локалізувати та детально аналізувати рух. Сингулярне розкладання (SVD) застосовується для обчислення норми Кі Фан для кожного фрагменту, що дозволяє виявити динамічні зміни між послідовними кадрами. Аналіз на рівні фрагментів дозволяє алгоритму надійно визначати області інтересу та розрізняти глобальний рух (рух камери) і локальний рух (рух об'єкта), незважаючи на проблеми, пов'язані з нестабільністю

камери. Стан руху класифікується на чотири категорії: стабільна камера без руху об'єкта, стабільна камера з рухом об'єкта, рухома камера без руху об'єкта та рухома камера з рухом об'єкта. Ця методологія на основі фрагментів підвищує точність динамічного аналізу сцени, пропонуючи масштабоване та ефективне рішення для таких підходів, як стабілізація відео, відстеження об'єктів і виявлення руху в реальному часі в складних середовищах.

Машталір Сергій Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформатики Харківського національного університету радіоелектроніки.

Лендель Дмитро Павлович – аспірант ІУСТ Ужгородського національного університету.

Mashtalir Sergii Volodymyrovych– Doctor of Engineering Science, professor, professor of informatics department Kharkiv National University of Radio Electronics, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0917-6622>, Scopus Author ID: 36183980100.

Lendel Dmytro Pavlovich – PhD student in Uzhhorod National University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3971-1945>, Scopus Author ID: 59390876900.

А.Ю. Зимогляд, А.І. Гуда, С.О. Ткаченко

ВПЛИВ СТРУКТУРИ ЗАПОВНЕННЯ ЗРАЗКІВ ПРИ 3D ДРУКУ НА ЇХ МІЦНІСТЬ

Анотація. У статті описано дослідження впливу структури заповнення 3D деталі на механічну міцність. Параметр заповнення (Infill) впливає на міцність та механічні властивості отриманого тривимірного об'єкта більше за інші. Тому саме цей параметр було досліджено в цій статті, її вплив на міцність надрукованої деталі.

У роботі було проведено дослідження впливу структури заповнення на механічні властивості деталі та проведено серію дослідів. Усього було перевірено 5 структур, а саме: зірка, клітинка, лінії, сітка та трикутник. За допомогою створеного устаткування, описаного у статті було проведено низька дослідів.

По отриманим даним можна зробити висновок, що деталі з заповненням трикутниками і зірками мають більшу механічну міцність, ніж лініями, сітками і клітинками. Також на цих заповненнях досягається більший модуль пружності.

Ключові слова: 3D print, структура заповнення деталі.

Вступ. Адитивні технології та зокрема 3D-друк - одна з форм технологій адитивного виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом накладання послідовних шарів матеріалу (друку, вирощування) за даними цифрової моделі. Друк здійснюється 3D-принтером, який забезпечує створення фізичного об'єкта шляхом послідовного накладання пластичного матеріалу на основі віртуальної 3D-моделі. 3D-принтери, як правило, швидші, більш доступні і простіші у використанні, ніж інші технології адитивного виробництва. 3D-принтери пропонують розробникам продуктів можливість друку деталей і механізмів з декількох матеріалів (PLA, ABS, та ін.) та з різними механічними і фізичними властивостями за один процес друку.

3D-друк часто називають «магічною» технологією, оскільки дозволяє перетворювати, отримані в CAD-системах моделі в готові вироби. У реальності процес 3D-друку вимагає також багато ручної праці, що включає попередню підготовку і подальшу обробку надрукованих деталей для досягнення їх бажаної якості.

Як і більшість верстатів з цифровим керуванням, 3D-принтери створюють тривимірний об'єкт за допомогою G-CODE. G-CODE є найбільш популярною мовою програмування комп'ютерного числового керування (CNC, computer numerical control), зокрема для керування 3D-принтерами. G-CODE складається з команд, що вказують рухи, швидкості, нагрівання екструдеру, нагрівання стола та інші параметри пристрою під час виробництва моделі. Кожна команда G-CODE має конкретний формат і відповідає

певному виробничому процесу або дії. Мова G-CODE була розроблена в далекому 1950 році у лабораторії MIT (також відома, як RS-274 вже після декількох змін від версії RS-273). Перша стандартизована версія була опублікована в 1963 році та фіналізована в 1982 (Standards for Computer Aided Manufacturing).

Для генерації G-CODE, який призначено для створення тривимірного об'єкта 3D-принтером використовується програмне забезпечення під назвою «слайсер» (Slicer). Slicer бере трьохвимірну модель у одному з спеціалізованих форматів, ділить її на окремі шари (товщину яких можна задати в налаштуваннях), а потім планує відповідний маршрут екструдера. При цьому існує безліч шляхів, як саме можна надрукувати ту чи іншу деталь, і використання кожного з шляхів задає певні властивості виробу. Також Slicer використовує велику множину різних параметрів, які задають правила створення тривимірного об'єкта, що друкується. До цих параметрів можна віднести: швидкість подачі (Feed Rate), рівномірність подачі (Flow Rate), температура екструдера (extruder) і ліжка*(bed), параметри шарування, підтримка (Support), заповнення (Infill), режими друку (Print Modes), матеріал: та інші.

Параметр заповнення (Infill) впливає на міцність та механічні властивості отриманого тривимірного об'єкта більше за інші. Тому саме цей параметр було досліджено в цій статті, її вплив на міцність надрукованої деталі.

Заповнення тривимірного об'єкта. Заповнення в процесі 3D-друку відіграє важливу роль, впливаючи на міцність, вагу та витрати матеріалів. Воно може автоматично підлаштовуватися під параметри друку, але оптимізація цих налаштувань дозволяє заощадити ресурси та покращити якість готових виробів. Правильний вибір типу заповнення допомагає досягти кращих результатів, зокрема щодо міцності, гнучкості чи естетики виробу. Основні різновиди заповнення можна умовно розділити на такі категорії: гнучкі деталі (використовуються для моделей, що потребують скручування чи гнучкості, зберігаючи структуру при зміні осей); підвищена точність; об'ємні типи заповнення (надають виробу додаткову міцність); стандартна міцність (універсальні налаштування для виробів середньої міцності підходить для повсякденного використання); декоративні вироби (оскільки міцність не є пріоритетом, основний акцент робиться на підтримці верхніх шарів, можна зменшити щільність заповнення або взагалі його уникнути).

Нижче представлені основні різновиди заповнення, що використовуються частіше за все.

На рис. 1 представлено прямолінійне заповнення. Воно є одним із найпоширеніших типів для 3D-друку. Воно утворює прямі лінії, які чергуються між шарами: один шар друкується в одному напрямку, наступний — під кутом 90°. Така техніка допомагає ефективно використовувати нитку без надлишкового накопичення матеріалу на перетинах, як це буває у випадку сітчастого заповнення. Це робить процес швидшим і економічнішим.

Порівняно з сіткою, прямолінійний варіант забезпечує вдвічі кращу підтримку верхніх шарів, при цьому споживаючи аналогічну кількість матеріалу. Цей тип єдиний, який рекомендується для заповнення зі 100% щільністю. Якщо в налаштуваннях вста-

новлено інший тип заповнення, але щільність збільшується до 100%, програма автоматично змінить його на прямолінійний.

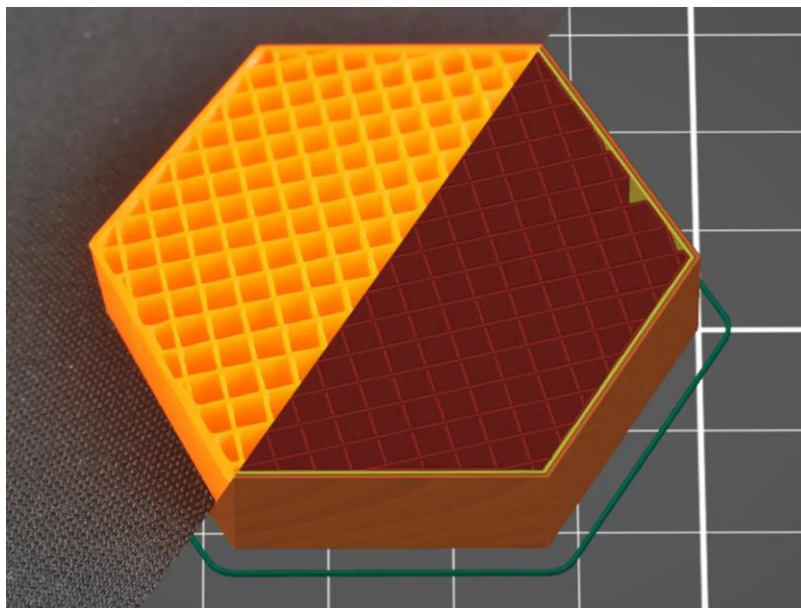


Рисунок 1 – Прямолінійне заповнення

На рис. 2 представлено сітчасте заповнення є одним із найпростіших та найшвидших варіантів для 3D-друку. Лінії перетинаються під кутом 90° в кожному шарі, що забезпечує високу міцність і кращу адгезію між шарами. Цей метод, на відміну від прямолінійного, дозволяє друкувати в обох напрямках, що значно прискорює процес.

Однак накопичення матеріалу в місцях перетину може викликати шум або навіть помилки під час друку, оскільки сопло проходить через ці точки. Якщо немає спеціальних вимог до виробу, сітчасте заповнення є універсальним рішенням, яке забезпечує баланс між міцністю, вагою та швидкістю друку.

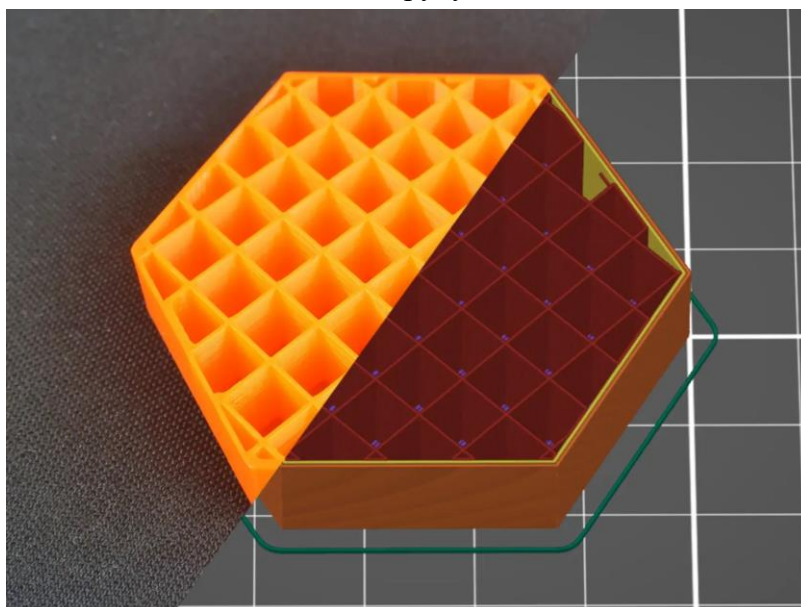


Рисунок 2 – Заповнення прямокутною сіткою

Шестикутне заповнення, або так звана “сотова” структура (рис. 3) створює сітку з шестикутників, яка є однією з найефективніших за своєю механічною стійкістю. Завдяки своїй геометрії, цей тип заповнення забезпечує рівномірний розподіл навантаження та чудову стійкість до деформацій, що робить його ідеальним для виробів, де необхідна висока міцність.

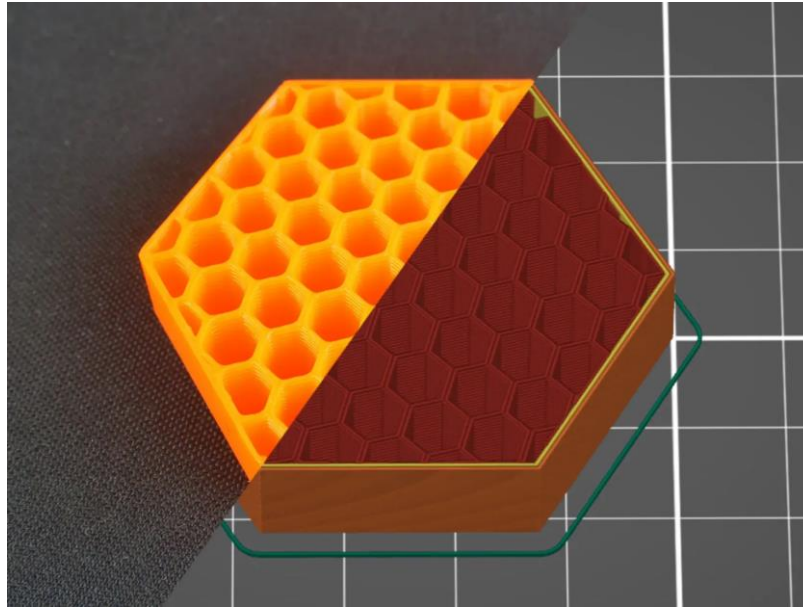


Рисунок 3 – Заповнення «соти»

Основна перевага шестикутного заповнення полягає в тому, що воно мінімізує ризик перетинів нитки, оскільки кожен шар друкується послідовно без зупинок або складних перетинів. Це зменшує ймовірність помилок під час друку та сприяє поліпшенню якості поверхонь. Однак цей тип заповнення має й свої недоліки. Він споживає на 25% більше матеріалу порівняно з іншими варіантами, такими як сітчасте або прямолінійне заповнення. Крім того, час друку значно збільшується — на деяких моделях цей тип заливки може потребувати вдвічі більше часу, що робить його менш ефективним для швидкого прототипування.

Зважаючи на це, шестикутна заливка часто використовується для виробів, де важлива максимальна міцність і стабільність, але не є найкращим вибором для економії матеріалу чи часу.

Заливка (рис. 4) у вигляді 3D-сот — це унікальний тип заповнення, який створює візерунок із чергуванням квадратів і восьмикутників. Ці елементи формують вертикальні стовпчики, що змінюються в товщині залежно від позиції в моделі. Головною особливістю цього типу заливки є те, що лінії не перетинаються в одному шарі, що забезпечує стабільну структуру без додаткового матеріалу на місцях перетинів.

Однак, через специфічний шлях друку, між шарами утворюються невеликі проміжки, що впливає на загальну міцність виробу. Такий підхід має трохи більшу витрату матеріалу і довший час друку, ніж класичні сотові візерунки. Попри це, 3D-соти пропонують унікальний баланс між міцністю та естетикою, роблячи їх гарним варіантом для виробів, де важливий зовнішній вигляд, а не лише механічні властивості.

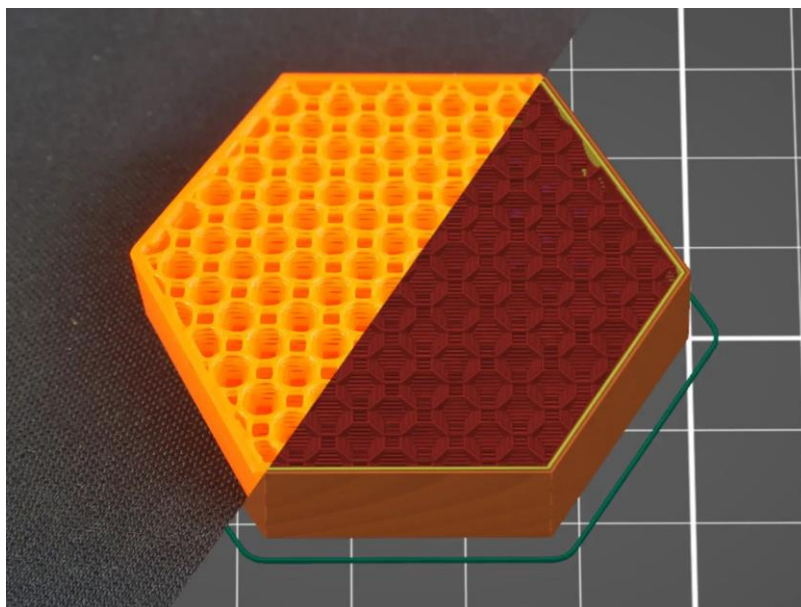


Рисунок 4 – Заповнення «3D соти»

Заливка «зірка» (рис. 5) характеризується шляхами, які перетинаються в межах одного шару, створюючи структуру у вигляді зірки, що орієнтована під певним кутом донизу. В результаті формуються численні повітряні кишені, які можуть слугувати як теплоізоляція або надавати об'єкту плавучість на воді, особливо при використанні водонепроникних матеріалів, таких як PETG. Час друку та витрата ниток залишаються на рівні з іншими варіантами заповнення.

Ця заливка ідеально підходить для виробів, які підлягають навантаженням. Об'ємне заповнення має вигляд симетричних пірамідок, що сприяє зменшенню жолоблення навантаження, яке розподіляється рівномірно по всьому виробу. Візуально на стінках моделей особливо помітно розташування ліній під діагональним кутом. Якщо ви прагнете уникнути цього ефекту, варто взяти відповідних заходів при налаштуванні друку.

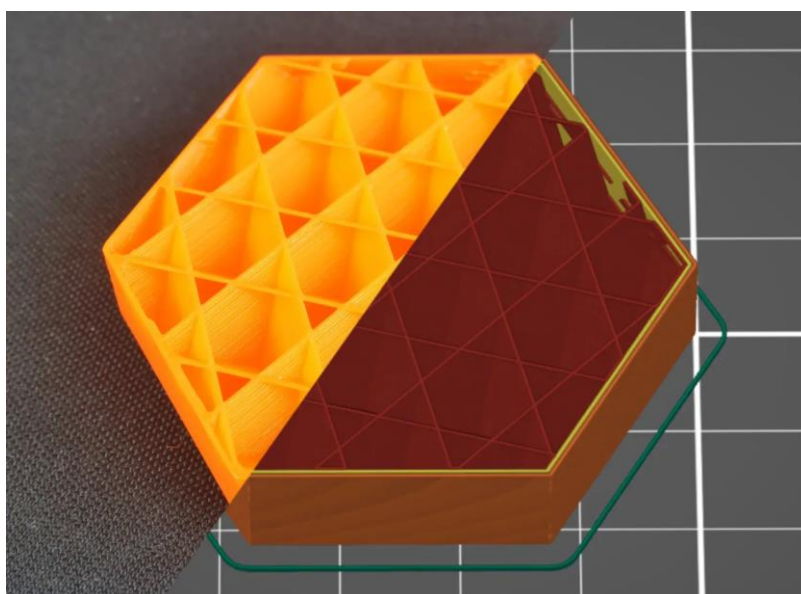


Рисунок 5 – Заповнення «зірка»

Цей тип заливки не лише забезпечує механічну стійкість, але й надає виробам унікальний вигляд, що робить його популярним вибором серед 3D-друкарів.

Представлені вище типи заливки, це основні, які частіше за все використовують. Взагалі існує більш ніж два десятка різних типів заливки і модифікацій цих типів. В дослідженні було обрано 5 найбільш різних типів, а саме: зірка, клітинка, сітка, трикутник і суцільні лінії.

Створення об'єкту дослідження. Для проведення дослідження впливу типу заливки на міцність деталі, створеної на 3D принтері було створено 10 зразків. По 2 зразки кожного типу заповнення, а саме: зірка, клітинка, сітка, трикутник і суцільні лінії.

В якості деталі було обрано пластину розміром 3x70мм, з 4 отворами 3 мм. Матеріалом було обрано PLA пластик, пластинка слугує частиною кріплення акумулятору для дрону (рис. 6).

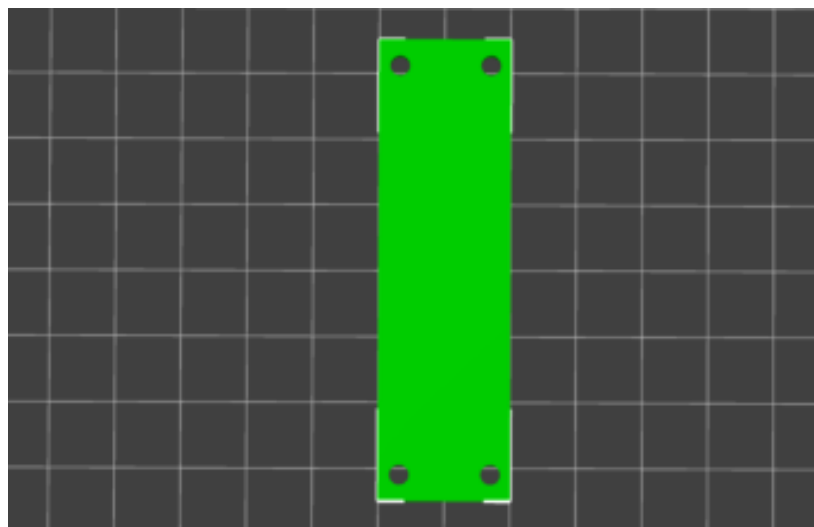


Рисунок 6 – Деталь кріплення акумулятору дрона

Для створення 3D моделі цієї деталі було використано середовище OpenSCAD (рис. 7).

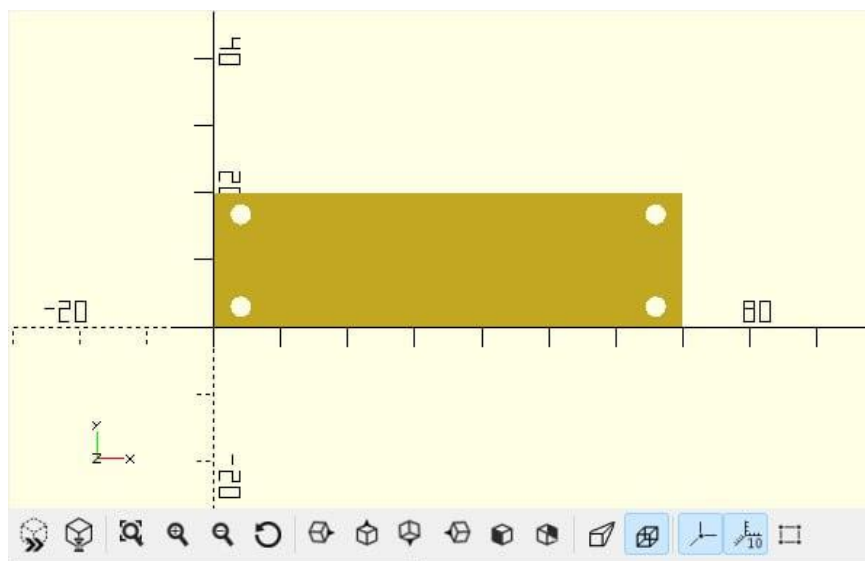


Рисунок 7 – Створена деталь в середовищі OpenSCAD

Лістинг коду деталі (середовище OpenSCAD) представлено нижче.

```
length = 70;
width = 20;
thickness = 3;
hole_diameter = 3;
hole_offset = 3; // Відстань від країв до отворів

module plate() {
  difference() {
    // Основна пластина
    cube([length, width, thickness]);

    // Ліві отвори
    translate([hole_offset, hole_offset, -0.1]) {
      cylinder(h = thickness + 0.2, d = hole_diameter, $fn
= 50);

      translate([0, width - 2 * hole_offset, 0])
        cylinder(h = thickness + 0.2, d = hole_diameter,
$fn = 50);
    }

    // Праві отвори
    translate([length - hole_offset, hole_offset, -0.1]) {
      cylinder(h = thickness + 0.2, d = hole_diameter, $fn
= 50);

      translate([0, width - 2 * hole_offset, 0])
        cylinder(h = thickness + 0.2, d = hole_diameter,
$fn = 50);
    }
  }
}

plate();
```

Після створення 3D моделі в середовищі OpenSCAD і отримання 3D моделі в форматі STL треба було згенерувати G-CODE. Для його генерації було обрано слайсер PrusaSlicer (рис. 8).

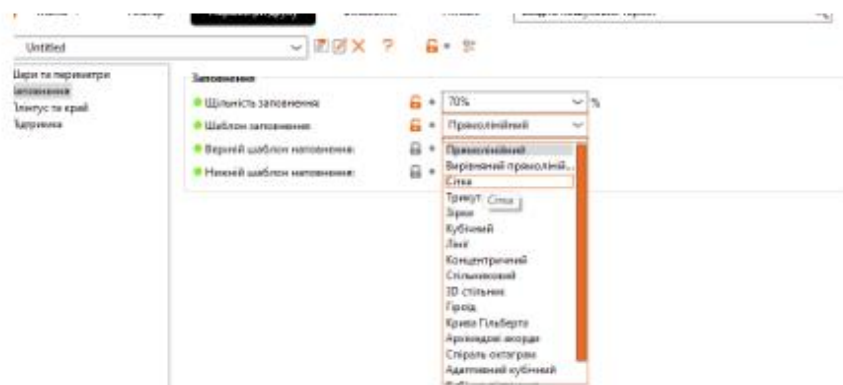


Рисунок 8 – Визначання типу заповнення у PrusaSlicer

За допомогою PrusaSlicer було згенеровано G-код для 5 зразків розробленої деталі з заповненням 70 % та різним шаблоном заповнення, а саме: зірка, клітинка, лінії, сітка та трикутник.

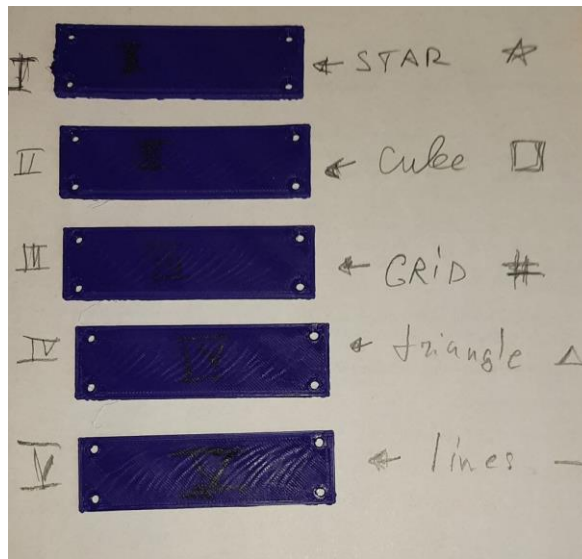


Рисунок 9 – Дослідні зразки з різним шаблоном заповнення

За допомогою отриманого G-коду 5 зразків було надруковано на 3D принтері (рис. 9).

Дослідження залежності структури заповнення на міцність надрукованої деталі. Для дослідження залежності структури заповнення на міцність було побудовано устаткування, яке структурно представлено на рис. 10.

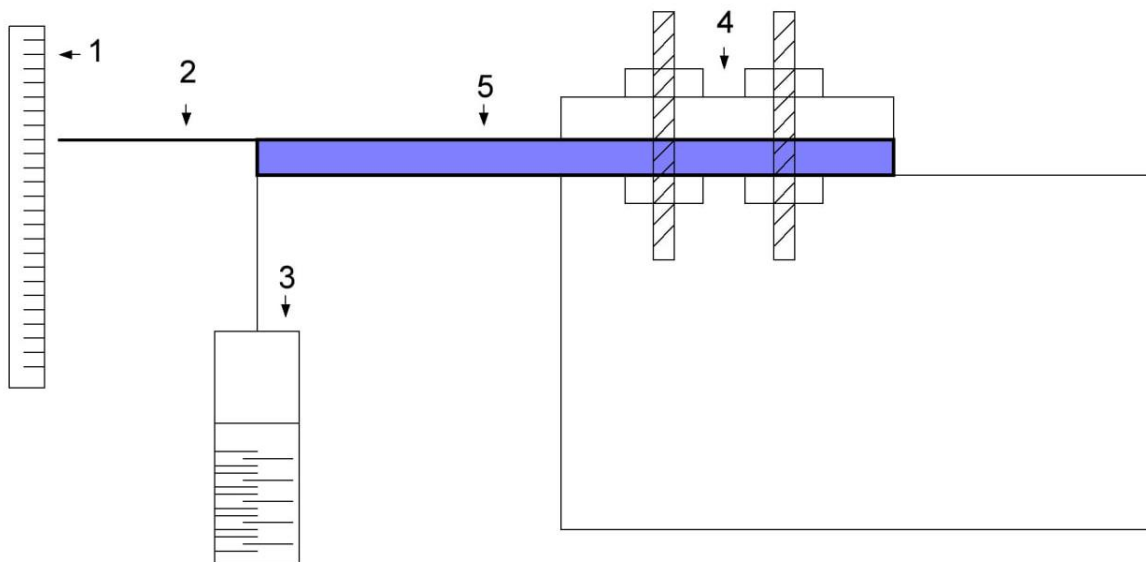


Рисунок 10 – Устаткування для дослідження надрукованих зразків

Устаткування (рис. 10) складається з: 1 – мірна шкала (транспортир); 2 – товста проволочка; 3 – ємність для води; 4 – кріплення зразку до столу; 5 – зразок, що досліджується.

В ході досліду в ємність для води поступово додавалася вода. При цьому досліджуємих зразок потроху нагинався. При цьому кут нахилу вимірювався за шкалою транспортиру по проволочці закріпленої на зразку.

Для кожного зразка бралось 10 точок з кроком 100 мл, по ним будувався графік залежності структури заповнення на механічну міцність. Результати вимірювань у пружній зоні представлено на рис. 11.

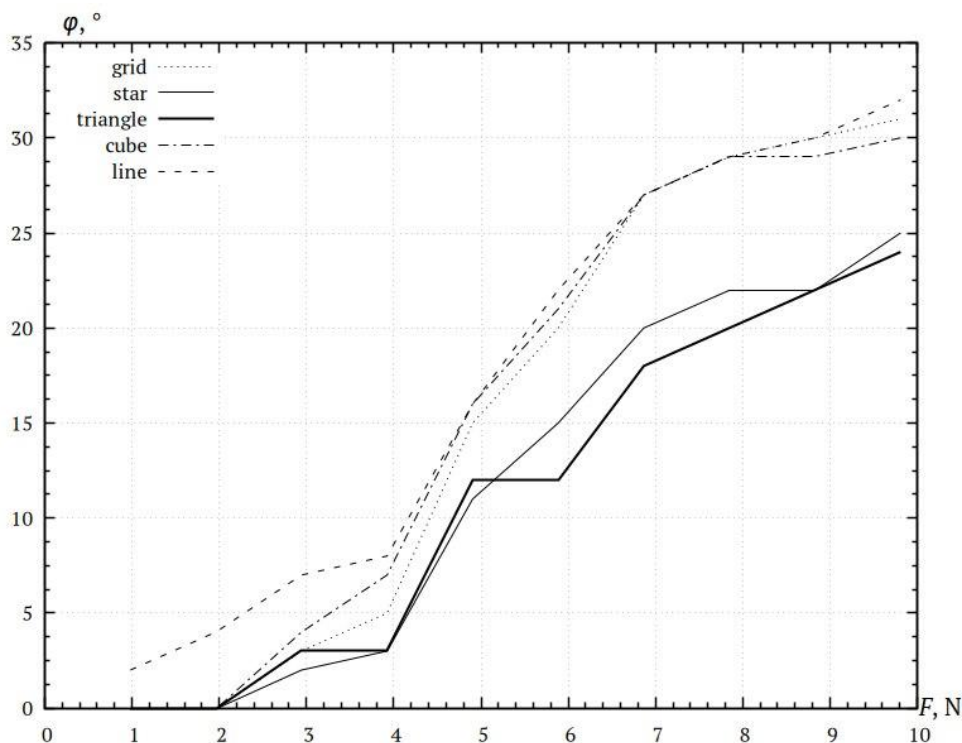


Рисунок 11 – Графік залежності кута нахилу кожного зразка від навантаження

Також було отримані умови навантаження, коли зразок було пошкоджено (Таблиця 1).

Таблиця 1

Назва зразка	Критичне навантаження, гр
line	2000
star	2700
grid	2200
triangle	3000
cube	2200

Висновки. Було проведено дослідження впливу структури заповнення на механічні властивості деталі та проведено серію дослідів. Усього було перевірено 5 структур, а саме: зірка, клітинка, лінії, сітка та трикутник. За допомогою створеного устаткування, описаного у статті було проведено низька дослідів.

По отриманим даним можна зробити висновок, що деталі з заповненням трикутниками і зірками мають більшу механічну міцність, ніж лініями, сітками і клітинками. Також на цих заповненнях достригається більший модуль пружності.

Також слід відмітити, що отримані результати мають суттєві похибки вимірювання. Тому результати, що були отримані, слід розглядати тільки як оцінні. Для отримання результатів, що можуть бути використано для досліджень з використанням кількісних характеристик, слід використовувати спеціалізоване обладнання. Також подальшого дослідження потребує питання анізотропії характеристик отриманих зразків.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Kruth J.-P. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping [Text] / J.-P. Kruth, M. C. Leu, T. Nakagawa // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1998. – Vol. 47, Issue 2. – P. 525–540.
2. Bruce M. R. Measurement and Simulation of Titanium Alloy Deposit Temperature in Electron Beam Additive Manufacturing / M. R. Bruce, S. F. Riley, M. J. Cola, V. R. Dave, J. E. Talkington // Trends in Welding Research 2012: Proceedings of the 9th International Conference. – Chicago, Illinois, USA, 2012. – P. 963–969.
3. Kruth J. P. Selective laser melting of iron-based powder / J. P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, B. Lauwers // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 149, Issue 1–3. – P. 616–622. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051

Received 03.03.2025.
Accepted 05.03.2025.

Influence of 3D printing samples filling structure on their strength

Additive manufacturing technologies, and in particular 3D printing, are a form of additive manufacturing technology where a three-dimensional object is created by applying successive layers of material (printing, growing) based on a digital model. Printing is performed by a 3D printer, which creates a physical object by successively applying plastic material based on a virtual 3D model. 3D printers are typically faster, more affordable, and easier to use than other additive manufacturing technologies. 3D printers offer product developers the ability to print parts and mechanisms from multiple materials (PLA, ABS, etc.) and with different mechanical and physical properties in a single printing process.

The Infill parameter affects the strength and mechanical properties of the resulting 3D object more than others. Therefore, this parameter was investigated in this article, its effect on the strength of the printed part.

The work investigated the influence of the filling structure on the mechanical properties of the part and conducted a series of experiments. A total of 5 structures were tested, namely: star, cell, lines, grid and triangle. Using the created equipment described in the article, a series of experiments were conducted. According to the data obtained, it can be concluded that parts filled with triangles and stars have greater mechanical strength than with lines, grids and cells. Also, a higher modulus of elasticity is observed on these fillings. It should also be noted that the results obtained have significant measurement errors. Therefore, the results obtained should be considered only as estimates. To obtain results that can be used for studies using quantitative characteristics, specialized equipment should be used. Also, the issue of anisotropy of the characteristics of the obtained samples requires further study.

Зимогляд Андрій Юрійович - к.т.н. доцент кафедри ІТС ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Український державний університет науки та технологій.

Гуда Антон Ігорович - д.т.н. професор кафедри ІТС ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Український державний університет науки та технологій.

Ткаченко Станіслав Олександрович - магістр кафедри ІТС ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Український державний університет науки та технологій.

Zimoglyad Andrew - candidate of technical science, assistant professor Department of ITS of the Scientific Research Institute "DMetI" of UDUNT.

Guda Anton Igorevich - doctor of engineering's sciences, professor Department of ITS of the Scientific Research Institute "DMetI" of UDUNT.

Tkachenko Stanislav Oleksandrovych - student of the ITS department Department of ITS of the Scientific Research Institute "DMetI" of UDUNT.

А.Ю. Єфіменко, В.В. Койбічук, С. В. Миненко, К.Г. Гриценко, В.В. Яценко

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯК КАТАЛІЗАТОР РОЗВИТКУ КІБЕРСПОРТИВНОЇ ІНДУСТРІЇ

Анотація. В умовах глобалізації та цифровізації суспільства кіберспортивні змагання стали не лише платформою для гравців і команд, а й потужним економічним драйвером, що охоплює стримінг, спонсорство та розробку ігор. Ключову роль у становленні кіберспортивної індустрії відіграє безпосередньо програмне забезпечення. Метою роботи є визначення ролі програмного забезпечення як каталізатору розвитку кіберспортивної індустрії. У статті виокремлено технологічні особливості сучасних графічних процесорів (GPU), що використовуються у кіберспортивній індустрії, а саме: кількість CUDA/Shader-ядер, типи інструкцій, підтримку нових технологій, пропускну здатність пам'яті та технології трасування променів, що у комплексі гарантує обробку та виведення високоякісної графіки. Запропоновано класифікацію функціональних видів програмного забезпечення, що становлять єдину систему взаємозв'язків. Серед спеціалізованого програмного забезпечення виділено платформи для управління турнірами (Toornament, Battlefy, Challonge, FACEIT), програмне забезпечення для стримінгу та трансляції (OBS Studio, Streamlabs, XSplit, Restream), програми для управління командами та гравцями (Discord, GameCoach), інструментарій для боротьби з шахрайством (Easy Anti-Cheat, BattleEye), програмні засоби віртуальної та доповненої реальності (VirZOOM, інструменти Oculus для VR-кіберспорту), а також сучасні технології блокчейн і NFT. Також розглянуто перспективи впровадження новітніх розробок на основі аналізу діяльності компаній-постачальників програмного забезпечення для кіберспортивної індустрії (Betfoc, INORU, Betinvest, BR Softech, Vinfotech) та кіберспортивних платформ (Battlefy, Toornament, Challonge, ESL Play та Mobalytics). Відповідно, програмне забезпечення для кіберспорту, у поєднанні з розвитком технологій та зростаючими вимогами до якості й інтерактивності ігор, продовжує еволюціонувати й потребує постійної адаптації до інноваційних змін.

Ключові слова: кіберспорт, геймінг, індустрія, програмне забезпечення, турнір, графічний процесор, віртуальна реальність.

Постановка проблеми. Кіберспорт за останні десятиліття трансформувався з аматорського виду діяльності у потужну глобальну індустрію, що супроводжується швидким технологічним прогресом, зростанням інтересу до відеоігор та формуванням міжнародної спільноти гравців, команд та аудиторії. Варто зазначити, що обсяг світового ринку кіберспортивної галузі збільшився з 694,2 млн доларів США у 2018 році до

2,22 млрд доларів США у 2024 році. Очікується, що до 2029 року кіберспортивна індустрія досягне 6,51 млрд доларів США, а середньорічний темп зростання знаходитиметься на рівні 24,0% [7].

З розвитком кіберспорту та індустрії відеоігор виникла потреба у спеціалізованих пристроях для геймінгу, зокрема, мишок, клавіатури та гарнітури. Попит на периферію спочатку стимулював традиційні бренди, зокрема Logitech, до створення ігрових девайсів, але згодом на ринку з'явилися спеціалізовані компанії, наприклад, Razer і HyperX, які сконцентрувалися виключно на продукції для геймерів. Більше того, розвиток відеоігор разом з іншими ресурсомісткими завданнями, зокрема, відеомонтажем та 3D-моделюванням, сприяв створенню нового програмного забезпечення.

Програмне забезпечення для кіберспорту включає у себе різні додатки та платформи, які полегшують роботу та управління змагальними відеоіграми. Ці інструменти призначені для гравців, команд, організаторів турнірів, глядачів та інших зацікавлених сторін в екосистемі кіберспорту. Серед них можна виділити такі платформи, як Toornament, Battlefy, Challonge, FACEIT, Streamlabs, XSplit, Restream та інші. Обсяг ринку ігрового програмного забезпечення демонструє значне зростання, генеруючи приблизно 139,57 млрд доларів США доходу у 2023 році [10]. Це підкреслює значний економічний вплив ігрового та кіберспортивного програмного забезпечення на світовий ринок. Програмне забезпечення для кіберспорту виконує ключову роль у створенні інноваційних платформ для управління командами, організації змагань, трансляцій і аналітики, що сприяє популяризації галузі та залученню нових інвестицій. Таким чином, обрана тема дослідження є актуальною, оскільки від ефективності програмного забезпечення залежить подальший розвиток індустрії, її конкурентоспроможність та економічна привабливість для учасників екосистеми кіберспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження у галузі кіберспорту акцентують увагу на ключовій ролі програмного забезпечення у процесі стабільного розвитку індустрії. Дослідженням зазначеного питання займалися як іноземні, так і українські науковці, серед яких: І. О. Лазнева, Д. І. Цараненко [15], Є. В. Чайка [16], А. Бялецький, М. Бартломей, Я. Гаєвський [5], Д. Гедлунд [11] та інші.

Бялецький та інші [5] зосередили своє дослідження на описі ключових характеристик спортивних наук (тренування, періодизація, планування та етапи кар'єри) та програмному забезпеченні (тренувальні інструменти, візуалізація, аналітика та системи зворотного зв'язку). Авторами було визначено, що сучасні дослідження кіберспорту в основному сконцентровані на описі та моделюванні показників ефективності, які охоплюють кілька фрагментованих дослідницьких областей (психологія, дієтологія, інформатика), але не представляють поглиблений аналіз у розрізі окремих структурних елементів забезпечення кіберспорту, зокрема, програмного забезпечення.

Д. Гедлунд [11] зазначав, що електронні ігри – це інтерактивні ігри, які використовують комп'ютерне програмне забезпечення, що працює за допомогою електронних схем, і часто відображаються через відео-, аудіо-, тактильні або інші види виходів. У роботі приділяється увага негативному та позитивному впливу електронних ігор на су-

часне суспільство, проте не розглядається технологічна складова кіберспортивної індустрії у розрізі програмного забезпечення. Відповідно, проблематика ролі програмного забезпечення у процесі розвитку кіберспорту потребує подальшого поглибленого вивчення.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Оскільки одним із елементів успіху кіберспортивної індустрії є програмне забезпечення, що охоплює створення ігор, організацію змагань, управління командами, аналіз даних, комунікацію із глядачами, метою дослідження є визначення його ролі як каталізатору розвитку кіберспорту.

Виклад основного матеріалу дослідження. Програмне забезпечення у кіберспорті включає платформи для створення та управління турнірами, аналітичні сервери, графічні процесори, стримінгові платформи та програмне забезпечення для трансляцій, платформи для VR та AR, хмарні сховища та інші програми.

Важливим програмним аспектом розвитку кіберспортивної індустрії стало впровадження графічних процесорів (GPU) – сучасних обчислювальних компонентів, що використовуються у комп'ютерах та системах штучного інтелекту. Ключовими елементами графічного процесора є архітектура (кількість ядер, типи інструкцій і підтримку нових технологій), кількість CUDA/Shader-ядер (обчислювальні одиниці), частота ядра (Base/Boost Clock), пропускна здатність пам'яті (Memory Bandwidth), технології трасування променів (Ray Tracing) тощо. Наприклад, архітектура NVIDIA Ampere (RTX 30) підтримує трасування променів у реальному часі та штучний інтелект та наявність спеціалізованих ядер у NVIDIA. У таблиці 1 представлена детальна характеристика елементів графічного процесора у розрізі кіберспортивної індустрії.

Таблиця 1

Характеристика елементів графічного процесора у розрізі кіберспортивної індустрії

Елемент	Характеристика
Архітектура	CUDA-ядра для NVIDIA; Stream-ядра для AMD. <u>Кількість ядер</u> : більше ядер дозволяє обробляти більше завдань одночасно, що підвищує загальну продуктивність. Сучасні моделі можуть мати тисячі ядер.
	<u>Типи інструкцій</u> : інструкції для трасування променів (ray tracing) у нових архітектурах, зокрема, у NVIDIA Ampere (RTX 30-серії), дозволяє реалізувати реалістичне освітлення та відображення у відеоіграх.
	<u>DLSS (Deep Learning Super Sampling)</u> : технологія від NVIDIA, яка використовує штучний інтелект для покращення якості зображення та підвищення FPS (Frames Per Second).
Пропускна здатність пам'яті (Memory Bandwidth)	показник, який вказує на обсяг даних, що може бути передано між графічним процесором (GPU) та його відеопам'яттю (VRAM) за секунду. Цей параметр є критичним для продуктивності GPU у задачах, що вимагають обробки великих обсягів даних, зокрема, рендеринг графіки, обчислення у штучному інтелекті або обробка ве-

	ликих відео.
Технології трасування променів (Ray Tracing)	сучасна технологія візуалізації, яка створює реалістичне освітлення, тіні та відбиття в графіці, моделюючи фізичну поведінку світлових променів, яка стала популярною завдяки впровадженню апаратної підтримки у графічних процесорах.

Джерело: авторська розробка на основі [13]

Варто зазначити, що пропускна здатність пам'яті розраховується за формулою (1):

$$\begin{aligned} & \text{Memory Bandwidth} = \\ & = \text{Memory Clock Speed} \times \text{Bus Width} \times \text{Number of Transfers per Clock Cycle}, \quad (1) \end{aligned}$$

де Memory Clock Speed – частота роботи пам'яті, зазвичай в мегагерцах (MHz) або гігагерцах (GHz);

Bus Width – ширина каналу передачі даних між пам'яттю і GPU, вимірюється в бітах;

Number of Transfers per Clock Cycle – кількість передач за такт.

У кіберспортивній індустрії для високоякісної графіки потрібно висока пропускна здатність, що обчислюється за представленою формулою (1).

Кіберспортивна галузь активно розвивається завдяки широкому використанню спеціалізованого програмного забезпечення, яке забезпечує ефективну організацію, управління та підтримку ігрового процесу. На рисунку 1 подано контекстуальний огляд основних видів програмного забезпечення індустрії у розрізі його функціонального призначення.



Рисунок 1 – Функціональні види програмного забезпечення кіберспортивної галузі (авторська розробка)

Серед програмного забезпечення для стрімінгу та трансляцій можна виділити OBS Studio – це безкоштовне програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом для запису відео та стрімінгу у реальному часі. Основними можливостями, окрім запису відео та стрімінгу, є підтримка мультиплатформності (працює на Windows, macOS та Linux), використання інструментів для редагування у реальному часі, вбудований мікшер для управління кількома аудіоджерелами, підтримка кодування відео через NVIDIA NVENC, AMD AMF та Intel Quick Sync Video.

XSplit – набір програмного забезпечення, який використовується для потокового мовлення та запису відео. Він забезпечує високу якість відео та аудіо потоків. Основними функціями XSplit є можливість запису відео для подальшого редагування або публікації, створення кастомізованих сцен із різними джерелами (відеокамерами, іграми, медіафайлами, веб-камерами тощо), можливості для налаштування якості відео і аудіо, оптимізовані під різні швидкості інтернет-з'єднання, підтримка вбудованих інтеграцій, таких як Streamlabs, Twitch Chat, YouTube Super Chat, StreamElements, можливість додавати користувацькі плагіни.

Технічні характеристики XSplit включають наступне:

- використання операційних систем Windows 7, 8, 10 (64-біт);
- використання процесору Intel i5 2.5 GHz або аналогічного AMD;
- оперативна пам'ять – мінімум 4 GB RAM;
- стабільне з'єднання з високою швидкістю для передачі відео у реальному часі (рекомендується швидкість від 3 Мбіт/с і більше);
- підтримка різноманітних форматів відео, зокрема, MP4, MKV, MOV, FLV [13].

Серед програмного забезпечення для управління командами та гравцями можна виокремити Discord та GameCoach. Discord – це популярна платформа для голосового, текстового та відеоспілкування, яка широко використовується геймерами та кіберспортсменами. Вона поєднує функціональність месенджера, відеоконференцій і форумів у єдиному інтуїтивно зрозумілому інтерфейсі. Основними характеристиками є:

- платформа організована у вигляді серверів, які можуть містити кілька текстових і голосових каналів;
- висока якість голосового та відеозв'язку;
- шеринг екрана або трансляція геймплею в режимі реального часу;
- інтеграція ботів для автоматизації, управління серверами, ігор;
- підтримка Windows, macOS, Linux, iOS, Android та веб-версію.

На противагу цьому, GameCoach є програмним інструментом вдосконалення навичок гравців у різних відеоіграх, що може включати автоматичний аналіз ігор, створення персоналізованих планів навчання, тренування точності та тактичного мислення.

До програмного забезпечення для боротьби з шахрайством і безпеки можна віднести Easy Anti-Cheat та BattleEye. Easy Anti-Cheat (EAC) – це система захисту від читерів, яка використовується у багатьох популярних онлайн-іграх для виявлення та блокування читів і шахрайських програм [4]. Зазначений інструментарій використовується у таких кіберспортивних дисциплінах, як Fortnite, Apex Legends, PUBG (PlayerUnknown's

Battlegrounds), Battlefield V, Tom Clancy's Rainbow Six Siege, Fall Guys: Ultimate Knockout.

BattleEye – це система античтів, яка використовується для виявлення та блокування шахраїв у онлайн-іграх. Зазначена програма, як і Easy Anti-Cheat (ЕАС), є важливим інструментом для підтримки чесності гри, запобігаючи використанню читів і інших типів шахрайства, таких як модифікація файлів гри або використання сторонніх програм для отримання переваги [3]. BattleEye відрізняється від Easy Anti-Cheat (ЕАС) тим, що працює на деяких платформах більш активно у порівнянні з іншими, постійно перевіряючи систему гравця на наявність читів. Зазначений інструментарій використовується у таких кіберспортивних дисциплінах, як PUBG (PlayerUnknown's Battlegrounds), Rainbow Six Siege, Arma 3, Fortnite, DayZ, Hunt: Showdown, Conan Exiles, Escape from Tarkov.

Серед інструментів віртуальної та доповненої реальності виділено VirZOOM та інструменти Oculus для VR-кіберспорту. VirZOOM – це технологія віртуальної реальності (VR), яка забезпечує інтерактивний досвід фітнесу та ігор, використовуючи фізичні рухи користувача для керування віртуальними об'єктами та персонажами. Її головною особливістю є те, що вона інтегрується з велотренажерами, дозволяючи користувачам активувати фізичні вправи в процесі гри чи тренування у віртуальному середовищі.

Окрім програмного забезпечення, яке представлено на рисунку 1, існує безліч інших інструментів та програм, що активно використовуються у кіберспорті. Наприклад, програмне забезпечення LAN-центру призначене для автоматизації всіх бізнес-процесів таких кіберспортивних одиниць, як кіберспортивної арени, ігрового лаунжу, кіберкафе, PC bang, ковортінгу тощо [12]. У даному випадку керувати комп'ютерами можна через хмарне програмне забезпечення для кібер-кафе, а з програмним забезпеченням для ігрових центрів SENET – отримати повний доступ до всіх ПК та ігрових консолей, обмежуючи клієнтів лише необхідними програмами.

Виділено п'ять ознак успішного постачальника програмного забезпечення для кіберспорту, а саме: великий досвід; виділена служба підтримки; гнучкість кастомізації на вимогу; клієнтоорієнтований підхід; передові технологічні рішення.

Також визначено ряд компаній, які відповідають зазначеним характеристикам, зокрема, Betfoc, INORU, Betinvest, BR Softech, Vinfotech (табл. 2).

Аналіз компаній у галузі розробки програмного забезпечення для іGaming та кіберспортивної індустрії демонструє, що ця сфера розвивається дуже швидко, охоплюючи новітні технології, зокрема, інтеграцію криптовалют, мультиплатформну розробку ігор та використання віртуальної реальності.

Компанії-постачальники програмного забезпечення для кіберспортивної індустрії

Компанія	Напрямок діяльності
Betfoc	компанія-світовий лідер у галузі програмного забезпечення для іGaming зі штаб-квартирою в Дубаї. У 2013 році стали першими у галузі, хто інтегрував криптовалюту у програмне забезпечення для онлайн-ставок, революціонізувавши спосіб здійснення транзакцій гравцями на ігрових платформах.
INORU	провідна компанія з розробки онлайн-ігор та мобільних додатків на ринку.
Betinvest	міжнародний постачальник технологій для спортивних розваг з повним циклом, зареєстрований у Великобританії. Можливості для кіберспортивної індустрії: цілодобові змагання у спортивних симуляторах, створення різних видів кіберспортивного контенту, зокрема шутерів від першої та третьої особи, MOBA та VR-шутерів.
BR Softech	індійська компанія, яка надає послуги з розробки мобільних ігор на HTML5, Hyper Casual, Web3, Blockchain, Poker та Fantasy Sports.
Vinfotech	індійська компанія, яка спеціалізується на розробці програмного забезпечення для фентезі-спорту, іGaming, платформ для торгівлі думками та рішень для залучення вболівальників.

Джерело: авторська розробка на основі [1, 8, 14]

У таблиці 3 представлені сучасні платформи та інструменти, що використовуються у кіберспортивній індустрії.

Платформи для забезпечення розвитку кіберспортивної індустрії

Платформи	Характеристика
Battlefy	дозволяє користувачам створювати турніри з різних ігор і керувати ними, пропонуючи такі функції, як підбір матчів, управління турнірною таблицею та реєстрація гравців.
Toornament	платформа, яка надає інструменти для організації, управління і трансляції турнірів, підтримує широкий спектр ігор та пропонує API для розробників для інтеграції їхніх сервісів.
Challonge	онлайн-платформа для створення, організації та управління турнірами. Вона дозволяє користувачам швидко і ефективно створювати турніри з різних видів спорту та ігор, в тому числі кіберспортивних змагань, забезпечуючи автоматичне управління розкладами, турнірними таблицями і підсумками.
ESL Play	платформа для організації кіберспортивних турнірів, яка включає управління турнірами, комунікації між учасниками, а також для забезпечення прозорості результатів.
Mobalytics	платформа, яка надає аналітику та інструменти для покращення гри в популярних кіберспортивних дисциплінах.

Джерело: авторська розробка на основі [2, 6, 9, 14]

Зазначені у таблиці 3 платформи задовольняють різні аспекти кіберспорту – від організації турнірів до залучення спільноти, а їхня ефективність може варіюватися залежно від конкретних потреб та жанрів ігор [14]. У зв'язку з постійною трансформацією технологій та популяризацією інструментів віртуальної і доповненої реальності, а також штучного інтелекту, раціональний вибір програмного забезпечення та компаній-постачальників стане каталізатором розвитку кіберспортивної індустрії.

Висновки. Програмне забезпечення у кіберспортивній індустрії являє собою комплекс різноманітних програмних інструментів та платформ, що забезпечують організацію, проведення та підтримку ігрового процесу, а також різні аспекти кіберспортивної діяльності, такі як тренування, трансляції, аналітика, безпека та взаємодія між учасниками. Під час проведення дослідження, метою якого було визначення ролі програмного забезпечення як каталізатору розвитку кіберспортивної індустрії, визначено особливості графічних процесорів (GPU) у розрізі архітектури (кількість CUDA/Shader-ядер, типи інструкцій, підтримка нових технологій), пропускної здатності пам'яті (Memory Bandwidth) та технології трасування променів (Ray Tracing). Також представлена порівняльна характеристика видів програмного забезпечення кіберспортивної галузі, що виконують різні функції та об'єднані у систему взаємозв'язків, зокрема, платформ для управління турнірами (Toornament, Battlefy, Challonge, FACEIT), програмного забезпечення для стрімінгу та трансляцій (OBS Studio, Streamlabs, XSplit, Restream), програм для управління командами та гравцями (Discord, GameCoach), інструментарію для боротьби з шахрайством (Easy Anti-Cheat, BattleEye), програмні засоби віртуальної та доповненої реальності (VirZOOM, інструменти Oculus для VR-кіберспорту), а також сучасні технології блокчейн і NFT, які використовуються для цифрових активів, ігрових предметів і нагород. Кожен вид зазначеного програмного забезпечення надає кіберспортивній індустрії необхідну інфраструктуру для якісного і ефективного розвитку.

Технології, як DLSS і трасування променів, відкривають нові горизонти візуалізації, підвищуючи реалістичність ігор. Крім того, забезпечення безпеки та запобігання шахрайству через античіт-системи, такі як Easy Anti-Cheat і BattleEye, має вирішальне значення для підтримки чесності у змаганнях. Платформи Battlefy, Toornament та ESL Play оптимізують процес організації турнірів і підвищують якість змагань завдяки продуманому управлінню та підтримці зручних функцій для користувачів. Визначено провідні компанії-постачальники програмного забезпечення для кіберспортивної індустрії, такі як Betfoc, INORU, Betinvest, BR Softech, Vinfotech, а також платформи для забезпечення розвитку кіберспортивної індустрії – Battlefy, Toornament, Challonge, ESL Play та Mobalytics.

Таким чином, програмне забезпечення у кіберспорті має вирішальне значення для ефективної організації та проведення турнірів, тренувань, трансляцій і боротьби з шахрайством. Програмні рішення не лише підтримують організаційні та операційні процеси, але й сприяють розвитку і вдосконаленню гравців, команд, а також трансляцій та турнірів. Стратегічне впровадження та вдосконалення програмних інструментів у розвиток кіберспортивної індустрії є ключовим фактором для її перспективного розвитку.

ЛІТЕРАТУРА

1. About Betfoc. *Betfoc*. URL: <https://www.betfoc.com/about-betfoc/> (Access date 2 January 2025).
2. About Us. *Battlefy*. URL: <https://battlefy.com/about> (Access date 2 January 2025).
3. About. *BattlEye*. URL: <https://www.battleeye.com/about/> (Access date 5 January 2025).
4. Anti-cheat made easy. *Easy Anti-Cheat*. URL: <https://www.easy.ac/en-US> (Access date 5 January 2025).
5. Bialecki A., Michalak B., Gajewski J. Esports Training, Periodization, and Software—A Scoping Review. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2024. Vol. 14. No. 22. DOI: 10.3390/app142210354.
6. Challonge is a Global Competition Platform. *Challonge*. URL: <https://challonge.com/about> (Access date 3 January 2025).
7. Esports Market. URL: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/esports-market-123759465.html?utm_source=chatgpt.com (Access date 2 January 2025).
8. ESPORTS. *Betinvest*. URL: <https://www.betinvest.com/esports> (Access date 2 January 2025).
9. Getting started. *Toornament*. URL: <https://developer.toornament.com/v2/overview/get-started> (Access date 3 January 2025).
10. Global gaming software revenue from 2022 to 2032. *Statista*. URL: https://www.statista.com/statistics/1450827/value-gaming-software-market-global/?utm_source=chatgpt.com (Access date 2 January 2025).
11. Hedlund D. P. Electronic gaming. *Encyclopedia of Sport Management, Second Edition*. 2024. P. 298-300. DOI: 10.4337/9781035317189.ch175.
12. LAN center software to automate all business processes. *SENET*. URL: https://senet.cloud/en/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAst67BhCEARIsAKKdWOkhRIDVxjCHZ43F1rj5tGSUMBB6-BmN3qKiGZ3UXSxQP2ix0fS9ok8aAsSBEALw_wcB&gclsrc=aw.ds (Access date 3 January 2025).
13. Lheureux A. GPU Memory bandwidth. *DigitalOcean*. 2024. URL: <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/gpu-memory-bandwidth> (Access date 6 January 2025).
14. Who are the best eSports software platform providers? URL: <https://www.quora.com/Who-are-the-best-eSports-software-platform-providers> (Access date 21 December 2024).
15. Лазнева І. О., Цараненко Д. І. Кіберспорт та його вплив на зміну структури світового ринку комп'ютерних ігор. Науковий вісник Ужгородського національного університету. 2018. № 22. С. 63-67. URL: http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/22_2_2018ua/17.pdf.
16. Чайка Є. В. Стан та динаміка росту ринку кіберспорту. *Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2018. № 15. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.15.2018.143144>.

REFERENCES

1. About Betfoc. *Betfoc*. URL: <https://www.betfoc.com/about-betfoc/> (date of access: 2 January 2025).
2. About Us. *Battlefy*. URL: <https://battlefy.com/about> (date of access: 2 January 2025).
3. About. *BattleEye*. URL: <https://www.battleeye.com/about/> (date of access: 5 January 2025).
4. Anti-cheat made easy. *Easy Anti-Cheat*. URL: <https://www.easy.ac/en-US> (date of access: 5 January 2025).
5. Bialecki A., Michalak B., Gajewski J. Esports Training, Periodization, and Software—A Scoping Review. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2024. Vol. 14. No. 22. DOI: 10.3390/app142210354.
6. Challonge is a Global Competition Platform. *Challonge*. URL: <https://challonge.com/about> (date of access: 3 January 2025).
7. Esports Market. URL: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/esports-market-123759465.html?utm_source=chatgpt.com (date of access: 2 January 2025).
8. ESPORTS. *Betinvest*. URL: <https://www.betinvest.com/esports> (date of access January 2025).
9. Getting started. *Toornament*. URL: <https://developer.toornament.com/v2/overview/get-started> (date of access: 3 January 2025).
10. Global gaming software revenue from 2022 to 2032. *Statista*. URL: https://www.statista.com/statistics/1450827/value-gaming-software-market-global/?utm_source=chatgpt.com (date of access: 2 January 2025).
11. Hedlund D. P. Electronic gaming. *Encyclopedia of Sport Management, Second Edition*. 2024. P. 298-300. DOI: 10.4337/9781035317189.ch175.
12. LAN center software to automate all business processes. *SENET*. URL: https://senet.cloud/en/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAst67BhCEARIsAKKdWOkhRIDVxjCHZ43F1rj5tGSUMBB6-BmN3qKiGZ3UXSxQP2ix0fS9ok8aAsSBEALw_wcB&gclsrc=aw.ds (date of access: 3 January 2025).
13. Lheureux A. GPU Memory bandwidth. *DigitalOcean*. 2024. URL: <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/gpu-memory-bandwidth> (date of access: 6 January 2025).
14. Who are the best eSports software platform providers? URL: <https://www.quora.com/Who-are-the-best-eSports-software-platform-providers> (date of access: 21 December 2024).
15. Lazneva I. O., Tsaranenko D. I. Esports and its impact on changing the structure of the world market of computer games. *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University*. 2018. № 22. C. 63-67. URL: http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/22_2_2018ua/17.pdf [in Ukrainian]
16. Chaika E.V. The state and dynamics of growth of the esports market. *Economic Bulletin of the National Technical University of Ukraine 'Kyiv Polytechnic Institute'*. 2018. No. 15. URL: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.15.2018.143144> [in Ukrainian].

Received 05.03.2025.
Accepted 07.03.2025.

Software as a catalyst for the esports industry development

Problem statement. In the context of globalization and the digitalization of society, esports competitions have evolved into not only platforms for players and teams but also powerful economic drivers encompassing streaming, sponsorship, and game development. Software plays a pivotal role in shaping the esports industry by serving as the technical foundation for its functioning. The aim of the work is to determine the role of software as a catalyst for the esports industry development. Methodology. A comprehensive approach was used to assess the role of software in the establishment and growth of esports, including a classification method for identifying functional types of software, a systematic approach to viewing them as an interconnected system, a comparative analysis of software tool providers and popular esports platforms, and content analysis of modern technologies in the context of their functional purposes. The results and discussion. The technological features of modern graphics processing units (GPUs) used in the esports industry are highlighted, namely: the number of CUDA/Shader cores, instruction types, support for new technologies, memory bandwidth and ray tracing technologies, which together guarantee the processing and output of high-quality graphics. The article offers a classification of functional types of software that constitute a single system of interconnections. Among the specialised software, the research allocates platforms for tournament management (Toornament, Battlefy, Challonge, FACEIT), software for streaming and broadcasting (OBS Studio, Streamlabs, XSplit, Restream), software for managing teams and players (Discord, GameCoach), anti-fraud tools (Easy Anti-Cheat, BattleEye), virtual and augmented reality software (VirZOOM, Oculus tools for VR esports), as well as modern blockchain and NFT technologies. Conclusions. The study identifies the main differences in the software used in the esports industry. Prospects for implementing advanced developments are analyzed based on the activities of software providers (Betfoc, INORU, Betinvest, BR Softech, Vinfotech) and esports platforms (Battlefy, Toornament, Challonge, ESL Play, and Mobalytics). Accordingly, esports software continues to evolve alongside technological advancements and growing demands for game quality and interactivity, creating new opportunities for participants and viewers. Modern tools and programs must adapt to technological innovations and be integrated into the esports industry to meet these challenges.

Key words: esports, gaming, industry, software, tournament, GPU, virtual reality.

Єфіменко Аліна Юрївна – докторка філософії, асистентка кафедри економічної кібернетики Сумського державного університету.

Койбічук Віталія Василівна – к.е.н., доцентка, завідувачка кафедри економічної кібернетики Сумського державного університету.

Миненко Сергій Володимирович – доктор філософії, старший викладач кафедри економічної кібернетики Сумського державного університету.

Гриценко Костянтин Григорович – к.т.н., доцент, доцент кафедри економічної кібернетики Сумського державного університету.

Яценко Валерій Валерійович – к.т.н., доцент, кафедра економічної кібернетики Сумського державного університету.

Yefimenko Alina Yurievna - PhD, Assistant Professor of the Economic Cybernetics Department, Sumy State University.

Koibichuk Vitaliia Vasylivna - PhD in Economics, Associate Professor, Head of the Economic Cybernetics Department, Sumy State University.

Mynenko Serhii Volodymyrovych - PhD, Senior Lecturer of the Economic Cybernetics Department, Sumy State University.

Hrytsenko Kostiantyn Hryhorovych - PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Economic Cybernetics Department, Sumy State University.

Yatsenko Valerii Valeriiovych - PhD in Engineering, Associate Professor, Economic Cybernetics Department, Sumy State University.

Є.О. Коваленко, В.А. Турчина

ПРО ПОКРАЩЕННЯ НАБЛИЖЕНИХ РОЗВ'ЯЗКІВ ЗАДАЧІ ПАРАЛЕЛЬНОГО УПОРЯДКУВАННЯ ТА АНАЛІЗ МОДЕЛІ ОДНОГО ЇЇ УЗАГАЛЬНЕННЯ

Анотація. Один із актуальних напрямків досліджень в теорії розкладів стосується тих задач, в яких при виконанні робіт дозволяються їх переривання. В даній роботі розглядається одна з постановок таких задач, до якої зводяться прикладні задачі пов'язані з оптимізацією певних виробничих процесів. Це стосується випадків, коли задану скінченну множину робіт, на порядок виконання яких накладаються технологічні обмеження, необхідно виконати використовуючи наявну кількість ресурсів в найкоротші терміни. В математичній постановці таку прикладну задачу можна звести до задачі паралельного упорядкування вершин орграфа. Досліджено можливість покращення наближених розв'язків цих задач за рахунок дозволу переривання робіт. Запропоновано модифікацію алгоритму розв'язання узагальненої задачі упорядкування для випадків, коли відповідний граф є регулярним і відноситься до підкласу повних дводольних.

Ключові слова: теорія розкладів, дискретна оптимізація, граф, регулярні графи, переривання, оптимальне розбиття, паралельні упорядкування, наближені розв'язки, узагальнення задачі.

Постановка проблеми. Деякі прикладні задачі організації процесу виготовлення продукції на виробництві, моделювання складних обчислювальних систем, ефективного управління ресурсами на проєктах та інші, пов'язані з плануванням на підприємствах, можуть зводитися до задач дискретної оптимізації, зокрема теорії розкладів. Для їх розв'язання розроблено методи та алгоритми, що дозволяють оптимізувати відповідні процеси залежно від конкретних потреб, як то скорочення загального часу завершення виконання робіт, мінімізація залучених ресурсів, виконання всього обсягу роботи в зазначені терміни, або зменшення відставання від них.

Одним з підкласів задач теорії розкладів є задачі паралельного упорядкування. За їх допомогою зручно моделювати такі прикладні задачі, де заздалегідь визначені скінченні множини робіт та ресурсів, за допомогою яких ці роботи мають бути виконані (станки, машини, процесори, люди, тощо). Вважається, що кожен виконавець може виконувати будь-яку роботу з однаковою ефективністю, причому щонайбільше одну в будь-який момент часу. На множині робіт задано частковий порядок, який відповідає технологічним обмеженням задачі. Залежно від постановки конкретної задачі необхід-

но мінімізувати або час завершення виконання усіх робіт, або максимум одночасно задіяних ресурсів без порушення технологічних обмежень.

Задачі упорядкування у класичній постановці передбачають, що множина робіт, час виконання кожної з яких рівний, задана за допомогою множини V вершин графа, тоді як множина дуг U відповідає технологічним обмеженням. Таким чином початкові умови задаються орієнтованим незваженим графом $G(V,U)$. Необхідно відшукати таке паралельне упорядкування S вершин заданого графа, яке або при заданій ширині $h(S)$ має мінімальну довжину $l(S)$, або при заданій довжині має мінімальну ширину [1].

В загальному випадку задачі упорядкування є NP -важкими, але були виділені їх підкласи, для розв'язання яких було розроблено точні алгоритми поліноміальної складності [2]. Один з таких алгоритмів заснований на рівневому принципі. Він дає точний розв'язок задачі упорядкування за умов, що граф задачі має структуру кореневого дерева або лісу, який складається з таких дерев. Інший алгоритм базується на лексикографічній розмітці вершин графа. Він є точним для графів без транзитивних дуг за умови, що $h = 2$. Застосування цих алгоритмів при розв'язанні задач упорядкування для довільних графів з рівними ваговими коефіцієнтами вершин в загальному випадку призводить до наближених розв'язків, при яких подекуди можливе збільшення значення цільової функції майже в два рази, порівняно з оптимальним.

Результати, отримані для класичних постановок задач упорядкування, хоч і моделюють деякі реальні процеси, більшу цінність представляють в теоретичному значенні. В прикладних задачах часто потрібно враховувати додаткові умови, що не зменшують складності задачі. Так наприклад, тривалість виконання робіт може бути різною, дозволені переривання при виконанні робіт, не всі виконавці можуть виконувати роботу в будь-який момент часу та ін. У [3] наведені деякі узагальнені формулювання таких задач, серед яких одним з випадків відповідає моделі, коли обмеження на кількість вершин, які можна розташовувати на фіксованих місцях, задається відповідним вектором.

Задачі побудови відповідних паралельних упорядкувань позначимо в загальному вигляді $S(A, B, C)$, де A — відповідає графу, який задає обмеження, B — заданому параметру задачі, C — цільовій функції.

В даній роботі основна увага приділяється задачам $S(G, h, l)$ та $S(G, h_i, l)$. В прикладних задачах дане узагальнення відображає ситуації, коли кількість доступних робочих ресурсів може змінюватися протягом того часу, який виділено на виконання робіт. Наприклад, якщо мова йде про людські ресурси, то їх зайнятість може змінюватися в результаті планування відпусток, скорочення або розширення штату. Кількість залучених станків або процесорів може залежати від масштабування виробничого процесу, або початку чи закінчення періоду обслуговування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прикладні задачі, що моделюються у вигляді задач комбінаторної оптимізації на графах привертають до себе увагу науковців. У роботі [4] розглядається оптимізаційна задача розміщення виробництва, в якій початкові умови задаються у вигляді графа. Розглянута авторами задача є NP -важною, через що метою дослідження була розробка ефективного алгоритму поліноміальної

складності для пошуку наближених розв’язків. У вигляді орієнтованого графа спеціального виду (вебграфа) моделюються зв’язки між вебсторінками, що дозволяє формувати та ефективно розв’язувати прикладні задачі оптимізації в цьому напрямку досліджень [5]. Цікавість дослідників також викликають задачі на графах певних структур. Так у [6] розглядається задача розмітки графів, що відносяться до підкласу регулярних. Такі графи знаходять практичне застосування у ряді прикладних задач. Випадок, коли задача управління проектом моделюється у вигляді задачі теорії розкладів розглядається у [7]. Окрема увага приділяється ситуації, коли в процесі виконання робіт, передбачених проектом, до нього залучаються додаткові ресурси та досліджується вплив дозволу переривань на загальну тривалість їх виконання.

Мета дослідження. З’ясувати, чи можна покращити якість наближених розв’язків для задач паралельного упорядкування, якщо дозволити переривання при виконанні робіт. Сформулювати алгоритм розв’язання узагальненої задачі для одного підкласу графів. Визначити умови, за яких цей алгоритм є точним.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо можливість зменшення значення цільової функції за умови дозволу переривань при застосуванні алгоритму, що заснований на рівневному принципі.

При довільній будові графа відома оцінка точності розв’язку [2]:

$$\frac{l_A}{l^*} \leq \frac{2h}{h+1}, \quad (1)$$

де l_A — довжина упорядкування, побудованого за алгоритмом, l^* — довжина оптимального упорядкування.

Також відомі умови, за яких оцінка (1) досяжна, і відповідно непокращувана. Розглянемо граф G_1 наступного вигляду.

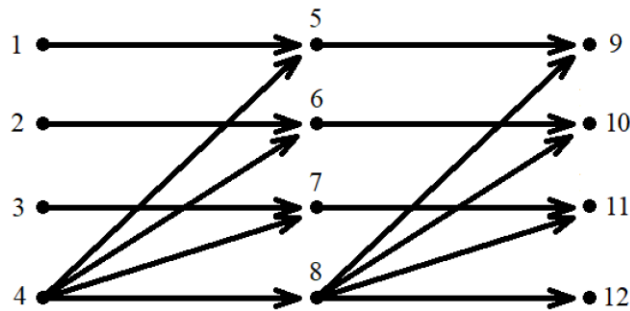


Рисунок 1 — Граф G_1

При заданій $h = 3$ застосування алгоритму дасть упорядкування:

$$\begin{pmatrix} 1 & 4 & 5 & 8 & 9 & 12 \\ 2 & & 6 & & 10 & \\ 3 & & 7 & & 11 & \end{pmatrix}.$$

В той час як оптимальним буде упорядкування:

$$\begin{pmatrix} 4 & 3 & 6 & 9 \\ 1 & 8 & 7 & 10 \\ 2 & 5 & 12 & 11 \end{pmatrix}.$$

Дійсно, для даного випадку виконується рівність

$$\frac{l_A}{l^*} = \frac{2h}{h+1} = \frac{6}{4}.$$

З'ясуємо, чи можна зменшити довжину упорядкування, побудованого за даним алгоритмом, якщо дозволити переривання. В першу чергу звертатимемо увагу на нещільно заповнені місця в упорядкуванні. Нехай дозволяється переривання роботи, що відповідає вершині 4. Тоді упорядкування матиме такий вигляд:

$$\begin{pmatrix} \{(4;0,5),(1;0,5)\} & (1;0,5) & (5,1) & (8,1) & (9,1) & (12,1) \\ (2,1) & (4;0,5) & (6,1) & & (10,1) & \\ (3,1) & & (7,1) & & (11,1) & \end{pmatrix}.$$

Довжина такого упорядкування $l_A = 5,5$. Якщо дозволити також переривання робіт, що відповідають вершинам 8 та 12, то отримане упорядкування

$$\begin{pmatrix} \{(4;0,5),(1;0,5)\} & (1;0,5) & \{(8;0,5),(5;0,5)\} & (5;0,5) & \{(12;0,5),(9;0,5)\} & (9;0,5) \\ (2,1) & (4;0,5) & (6,1) & (8;0,5) & (10,1) & (12;0,5) \\ (3,1) & & (7,1) & & (11,1) & \end{pmatrix}$$

матиме довжину $l_A = 4,5$.

Розглянемо також алгоритм заснований на застосуванні лексикографічної розмітки графа. При $h > 2$ в загальному випадку він дає наближений розв'язок. В [2] було оцінено точність алгоритму для випадків $h \geq 3$, яка описується співвідношенням:

$$\frac{l_A}{l^*} \leq 2 - \frac{2}{h}. \quad (2)$$

В якості одного з прикладів автори наводять розв'язок задачі для графа G_2 , зображеного на рис. 2 при $h = 3$.

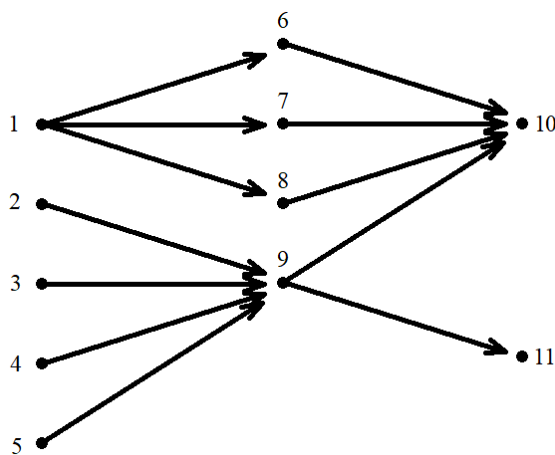


Рисунок 2 — Граф G_2

Розв'язок, отриманий за допомогою алгоритму

$$\begin{pmatrix} 3 & 1 & 7 & 6 & 10 \\ 4 & 2 & 8 & 11 \\ 5 & 9 \end{pmatrix}$$

має довжину $l_A = 5$, тоді як довжина оптимального упорядкування

$$\begin{pmatrix} 1 & 4 & 7 & 10 \\ 2 & 5 & 8 & 11 \\ 3 & 6 & 9 \end{pmatrix}$$

складає $l^* = 4$. Дійсно, повертаючись до відношення (2), маємо:

$$\frac{l_A}{l^*} \leq 2 - \frac{2}{3} \Rightarrow \frac{5}{4} < \frac{4}{3}.$$

Нехай граф G'_2 отримано з графа G_2 шляхом вилучення з нього вершин 10 і 11 та інцидентних до них дуг, після чого спрямування решти дуг було змінено на протилежне (рис. 3).

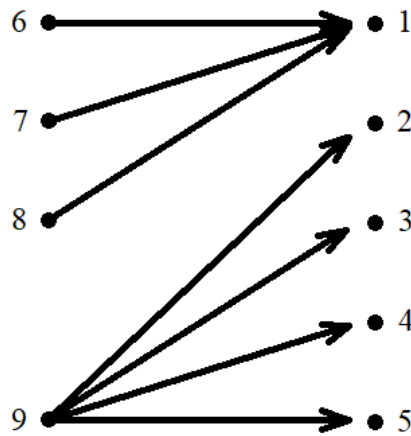


Рисунок 3 — Граф G'_2

Упорядкування побудоване за алгоритмом

$$\begin{pmatrix} 6 & 1 & 2 & 5 \\ 7 & 9 & 3 \\ 8 & 4 \end{pmatrix}$$

має довжину $l'_A = 4$, а оптимальне упорядкування — довжину $l^* = 3$. Якщо дозволити переривання роботи 1, яка відповідає вершині розміщеній на частково заповненому місці, то це не вплине на оптимальність розв'язку. Натомість дозвіл на переривання робіт 5 та 9 призведе до того, що побудоване упорядкування матиме довжину $l'_A = 3$, рівну оптимальній:

$$\begin{pmatrix} \{(9;0,5),(6;0,5)\} & \{(6;0,5),(5;0,5)\} & \{(3;0,5),(5;0,5)\} \\ (7,1) & \{(9;0,5),(3;0,5)\} & (2,1) \\ (8,1) & (1,1) & (4,1) \end{pmatrix}.$$

Отже, в загальному випадку дозвіл на переривання довільної вершини, розміщеної на частково заповненому місці, не гарантує покращення наближеного розв'язку.

Розглянемо випадки, коли в задачі задано $G(V,U)$, де $|V| = n$ та замість ширини h множина значень $h_i \leq n$, де $i = \overline{1, n}$. Для графів G , які містять множину ізольованих вершин (тобто $U = \emptyset$), було запропоновано точні алгоритми розв'язання відповідних узагальнених задач для випадків, коли переривання заборонені (алгоритм 1), та коли дозволені для усіх робіт (алгоритм 2) [3].

Розглянемо можливість модифікації цього алгоритму для випадків, коли граф задачі відноситься до підкласу регулярних, а саме має структуру повного дводольного, тобто $G = K_{m,r}$ де $m + r = n$. Як було зазначено в [8] в цьому випадку вершини першої долі графа можуть бути занесені до упорядкування таким же чином, як і у випадку, коли $U = \emptyset$. Зрозуміло, що після цього до упорядкування вершини другої долі можуть заноситися в довільному порядку.

При занесенні вершин першої долі можуть виникнути два випадки залежно від того, чи виконується умова:

$$\exists k : \sum_{i=1}^k h_i = m. \quad (3)$$

Якщо (3) виконується, то усі m вершин першої долі можуть бути занесені до упорядкування таким чином, що місця з першого по k -те будуть щільно заповнені, і дозвіл переривань для цих вершин не покращить значення цільової функції. Для побудови цієї частини упорядкування можна скористатися алгоритмом 1, вважаючи, що замість n маємо m вершин. Тоді залишиться внести до упорядкування r вершин другої долі. Для них перевіряється виконання аналогічної умови, але відлік починається уже з місця $(k+1)$. Умова матиме наступний вигляд:

$$\exists p : \sum_{i=k+1}^{k+p} h_i = r. \quad (4)$$

Якщо (4) виконується, то усі вершини другої долі займатимуть в упорядкуванні щільно місця з $(k+1)$ -го по p , а переривання будуть недоцільними і для робіт, що відповідають вершинам другої долі. В разі невиконання умови (4) для внесення до упорядкування вершин другої долі можна застосовувати алгоритм 2, вважаючи місце під номером $(k+1)$ першим, а кількість вершин дорівнює r замість n .

У випадку, коли умова (3) не виконується, вершини першої долі графа можуть бути занесеними до упорядкування за алгоритмом 2, приймаючи n рівним m . Тоді місця упорядкування з першого по k -те будуть заповнені щільно, а місце $(k+1)$ — майже щільно, при цьому воно буде заповнене на величину

$$c = \frac{m - \sum_{i=1}^k h_i}{h_{k+1}}, \quad (5)$$

де $0 < c < 1$. При цьому очевидно при виконанні робіт, що відповідають вершинам цієї доли, переривання будуть необхідними (не обов'язково для всіх вершин). Для розподілу решти вершин перевірка умови (4) не потрібна. Для розміщення в упорядкуванні вершин другої доли пропонується використання алгоритму 2 з наступними модифікаціями.

Алгоритм.

Крок 0. Вважається, що вершини першої доли графа занесені в упорядкування S' за алгоритмом 2 і значення c обчислене за (5).

Крок 1. Усі місця в S вважаються порожніми, причому перше місце може бути заповнене лише на величину $(1-c)$, де $0 < c < 1$; $h_1 = h'_{k+1}$, де h'_{k+1} отримано з алгоритму 2.

Крок 2. $p = 1$.

Якщо виконується умова

$$(\min(h_1, r))(1-c) + \sum_{i=2}^{p+1} h_i \geq r \quad (6)$$

то $l_{II}^* = \max\left(1-c + \frac{r - (\min(h_1, r))(1-c)}{h_{p+1}}, 1\right)$ та перехід на крок 5, інакше перехід на крок 4.

Крок 3. Якщо виконується умова (6), то

$$l_{II}^* = p - c + \frac{r - \left((\min(h_1, r))(1-c) + \sum_{i=2}^p h_i\right)}{h_{p+1}}$$

і перехід на крок 5.

Крок 4. $p = p + 1$ та перехід на крок 3.

Крок 5. $j = 1$, $c_j = 0$.

Крок 6. Визначається підмножина $H_{(j)} \subset \{h_1, h_2, \dots, h_{p+1}\}$ таким чином, що $h_i \geq j \Rightarrow h_i \in H_{(j)}$.

Крок 7. $\forall h_i \in H_{(j)}$ на місця i в упорядкування заносяться вершини в наступному порядку, за необхідності застосовуючи розбиття:

- 1) якщо $j > 1$ і виконується умова $H_{(j)} \neq \{h_{p+1}\} \cap H_{(j)} \neq \{h_1\}$, то та вершина, для якої $c_j > 0$;
- 2) $|H_{(j)}|$ вершин якщо $c_j + |H_{(j)}| < l_{II}^*$, інакше $|H_{(j)}| - \lfloor (l_{II}^* - c_j) \rfloor$ вершин;

3) якщо $c_j + |H_{(j)}| > l_{II}^*$, то обрана до занесення в упорядкування вершина q розбивається на часові інтервали t та $(1 - t)$ так, що $c_j + (|H_{(j)}| - 1) - (1 - t) = l_{II}^*$, причому до (q, t) теж може бути застосоване розбиття.

Крок 8. Якщо $c_j > 0$ та виконується умова $H_{(j-1)} = \{h_i\} \cup H_{(j)} = \{h_i\}$, то замість внесення частини розбиття вершини (v, c_j) на позицію i обирається одна вершина v' серед внесених до упорядкування, для якої виконуються умови:

- 1) $v' \notin S[i]$;
- 2) $(v', t') \in S$, де $c_j \leq t' \leq 1$.

В упорядкуванні (v', t') замінюється на $\{(v, c_j), (v', t' - c_j)\}$ або $\{(v, c_j)\}$ якщо $t' = c_j$, а на позицію i ставиться (v', c_j) .

Крок 9. Якщо $j < \max_i h_i$ то $j = j + 1$, $c_j = t$ та перехід на крок 6, інакше формуємо упорядкування S^* , де

$$S^*[i] = \begin{cases} S'[i], & \text{якщо } i \leq k \\ S'[i] \cup S[i], & \text{якщо } i = k + 1. \\ S'[i - k], & \text{якщо } i > k + 1 \end{cases}$$

Крок 10. Кінець алгоритму.

Проілюструємо роботу наведеного алгоритму на наступному прикладі.

Приклад 1. Для повного дводольного графа $K_{8,6}$, та заданої послідовності h_i (4, 6, 5, 3, 3, 5, 2, 4, 3, 4, 5, 2, 3, 4) знайти упорядкування вершин, яке має мінімальну довжину.

Для визначеності вважатимемо, що вершини першої долі мають номери від 1 до 8, відповідно вершини другої — від 9 до 14. Упорядкування у випадку заборонених переривань матиме наступний вигляд:

$$\begin{pmatrix} 1 & 5 & 9 & 14 \\ 2 & 6 & 10 & \\ 3 & 7 & 11 & \\ 4 & 8 & 12 & \\ & & & 13 \end{pmatrix}.$$

Його довжина $l^* = 4$. Коли переривання дозволені, за алгоритмом 2 вносимо вершини першої долі до упорядкування:

$$\left(\begin{array}{l} \left\{ \left(1, \frac{2}{3} \right), \left(7, \frac{1}{3} \right) \right\} \quad \left(2, \frac{2}{3} \right) \\ \left\{ \left(2, \frac{1}{3} \right), \left(3, \frac{2}{3} \right) \right\} \quad \left\{ \left(3, \frac{1}{3} \right), \left(4, \frac{1}{3} \right) \right\} \\ \left\{ \left(4, \frac{2}{3} \right), \left(5, \frac{1}{3} \right) \right\} \quad \left(5, \frac{2}{3} \right) \\ \left\{ \left(6, \frac{1}{3} \right), \left(8, \frac{2}{3} \right) \right\} \quad \left(7, \frac{2}{3} \right) \\ \left\{ \left(1, \frac{1}{3} \right), \left(8, \frac{1}{3} \right) \right\} \\ \left(6, \frac{2}{3} \right) \end{array} \right).$$

Тепер можна внести до упорядкування вершини другої долі за модифікованим алгоритмом. Отримуємо наступне упорядкування:

$$\left(\begin{array}{l} \left\{ \left(1, \frac{2}{3} \right), \left(7, \frac{1}{3} \right) \right\} \quad \left\{ \left(2, \frac{2}{3} \right), \left(9, \frac{1}{3} \right) \right\} \quad \left\{ \left(9, \frac{10}{15} \right), \left(10, \frac{2}{15} \right) \right\} \\ \left\{ \left(2, \frac{1}{3} \right), \left(3, \frac{2}{3} \right) \right\} \quad \left\{ \left(3, \frac{1}{3} \right), \left(4, \frac{1}{3} \right), \left(10, \frac{1}{3} \right) \right\} \quad \left\{ \left(10, \frac{8}{15} \right), \left(11, \frac{4}{15} \right) \right\} \\ \left\{ \left(4, \frac{2}{3} \right), \left(5, \frac{1}{3} \right) \right\} \quad \left\{ \left(5, \frac{2}{3} \right), \left(11, \frac{1}{3} \right) \right\} \quad \left\{ \left(11, \frac{6}{15} \right), \left(12, \frac{6}{15} \right) \right\} \\ \left\{ \left(6, \frac{1}{3} \right), \left(8, \frac{2}{3} \right) \right\} \quad \left\{ \left(7, \frac{2}{3} \right), \left(12, \frac{1}{3} \right) \right\} \quad \left\{ \left(12, \frac{4}{15} \right), \left(13, \frac{8}{15} \right) \right\} \\ \left\{ \left(1, \frac{1}{3} \right), \left(8, \frac{1}{3} \right), \left(13, \frac{1}{3} \right) \right\} \quad \left\{ \left(13, \frac{2}{15} \right), \left(14, \frac{10}{15} \right) \right\} \\ \left\{ \left(6, \frac{2}{3} \right), \left(14, \frac{1}{3} \right) \right\} \end{array} \right)$$

Його довжина $l_{II}^* = 2\frac{4}{5}$.

Твердження 1. Модифікований алгоритм для задачі $S(K_{m,r}, h_i, l)$ у випадку, коли не виконується умова (3) та дозволені переривання, є точним.

Доведення. Очевидно, що при застосуванні немодифікованого алгоритму в побудованій частині упорядкування, де розміщуються вершини першої долі, лише останнє місце буде заповнено нещільно. Отже, якщо при застосуванні модифікованого алгоритму щільно або майже щільно будуть розміщені вершини другої долі, то побудоване упорядкування буде оптимальним.

Доведемо твердження окремо для випадків, коли умова (6):

$$(\min(h_1, r))(1-c) + \sum_{i=2}^{p+1} h_i \geq r$$

виконується при $p = 1$ та при $p \geq 2$.

При $p = 1$ якщо $r < h_1$, то можна вважати, що $h_1 = r$, адже на це місце можна розмістити лише r розбиттів вершин. Тоді ця умова фактично перетворюється на $h_1(1-c) + h_{p+1} > r$. При оцінці довжини, яку займуть вершини в цьому випадку, розглядається

максимум $l_{II}^* = \max\left(1 - c + \frac{r - h_1(1-c)}{h_{p+1}}, 1\right)$, тобто навіть якщо

$1 - c + \frac{r - h_1(1-c)}{h_{p+1}} < 1$, упорядкування можна дозаповнити не менше, ніж на величину

однієї вершини, тобто 1. В іншому разі дозаповнюється $(k+1)$ -е місце упорядкування (або перше місце за модифікованим алгоритмом) на величину $(1-c)$. Таким чином це місце буде заповнене щільно. На друге місце упорядкування розподіляються $r - h_1(1-c)$ вершин. Повертаючись до умови (6), легко бачити, що $h_{p+1} > r - h_1(1-c)$, отже ці вершини можуть бути розміщені на даному місці так, що його заповненість

складатиме $\frac{r - h_1(1-c)}{h_{p+1}}$.

У випадку, коли умова (6) виконується при $p \geq 2$, так само до щільності дозаповнюється перше місце за модифікованим алгоритмом, тобто розподіляються розбиття вершин із сумарною величиною $h_1(1-c)$. Також щільно заповнюються місця з другого по p -те загалом на $\sum_{i=2}^p h_i$. Таким чином, розміщено $r - \left(h_1(1-c) + \sum_{i=2}^p h_i\right)$ вершин на місцях з першого по p -те. За умовою (6) маємо $h_{p+1} > r - \left(h_1(1-c) + \sum_{i=2}^p h_i\right)$, тобто решта

вершин, які розбиваються, можуть бути розміщені на $(p+1)$ -ому місці, дозаповненням його на частку

$\frac{r - \left(h_1(1-c) + \sum_{i=2}^p h_i\right)}{h_{p+1}}$.

Таким чином, розподіл вершин другої долі за модифікованим алгоритмом є оптимальним.

Твердження 2. Умови $h_i \leq m$ при $1 \leq i \leq k+1$ та $h_i \leq r$ при $k+2 \leq i \leq k+p+1$ є достатніми для того, щоб модифікований алгоритм був точним для k та p взятих з нерівностей:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k h_i < m < \sum_{i=1}^{k+1} h_i \\ \sum_{i=k+1}^{k+p} h_i < r < \sum_{i=k+1}^{k+p+1} h_i \end{cases} .$$

Доведення. Розглянемо окремо умови твердження. Достатність першої з них ($h_i \leq m$ при $1 \leq i \leq k+1$) доводиться за аналогією до того, як це було зроблено для твердження 2, наведеного у [3].

Доведемо достатність другої умови. За модифікованим алгоритмом $(k+1)$ -е місце упорядкування дозаповнюється розбиттями вершин другої долі, причому якщо $m \leq r$, то до щільного заповнення. В іншому разі щільне заповнення буде неможливим через те, що згідно з алгоритмом вершини, які залишилися, не можна буде розбити відповідним чином. Якщо $p > 1$, то місця з $(k+2)$ -го по $(k+p)$ -е будуть щільно заповнені. Місце $(k+p+1)$ буде заповнене на сталу частку тільки якщо $h_{k+p+1} \leq r$. Інакше дозаповнити це місце на відповідну величину неможливо.

Висновки. Проаналізовано ефективність двох відомих алгоритмів поліноміальної складності, які є точними для двох спеціальних класів графів, та наближеними для довільних графів. Досліджено можливість покращення наближених розв'язків за рахунок дозволу переривань при розміщенні вершин.

Для задачі упорядкування в узагальненій постановці розглянуто алгоритм її розв'язання, який враховує дозвіл на переривання робіт, і є точним для випадків, коли відповідний граф складається лише з ізольованих вершин. Запропоновано модифікацію цього алгоритму, яка дозволяє отримувати точні розв'язки, коли граф задачі має структуру повного дводольного.

ЛІТЕРАТУРА

1. Burdyuk V.Ya., Turchyna V.A. Algoritmi parallelnogo uporyadocheniya: uchebnoe posobie. Dnepropetrovsk: DGU, 1985. 83 p. (in Russian)
2. Coffman E. G., Bruno J. L. Computer and job-shop scheduling theory. New York : Wiley, 1976. 299 p.
3. Коваленко Є.О., Турчина В.А. Про один частковий випадок задачі паралельного упорядкування. *Theoretical and empirical scientific research: concept and trends*. 2024. С. 222-226. Режим доступу: <https://doi.org/10.36074/logos-02.02.2024.044>.
4. Kozin I. V., Narzullaev U. H., Allomov Z. K. The shuffle frog leaping algorithm for the production location problem. *Computer science and applied mathematics*. 2023. No. 1. P. 11–18. Mode of access: <https://doi.org/10.26661/2786-6254-2023-1-02>.
5. Долотов І. О., Гук Н. А. Кластеризація зваженого вебграфу із використанням модularity. *Питання прикладної математики і математичного моделювання*. 2023. Вип. 23. С. 45-52. Режим доступу: <https://doi.org/10.15421/322305>.
6. Semeniuta M. F. Combinatorial configurations in the definition of antimagic labelings of graphs. *Cybernetics and systems analysis*. 2021. Vol. 57, no. 2. P. 196–204. Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00344-y>.
7. Nakonechna T. V. On the influence of interruptions in the jobs execution in project management. *Problems of applied mathematics and mathematical modeling*. 2024. Vol. 24. P. 151-158. Mode of access: <https://doi.org/10.15421/322416>.
8. Турчина В.А., Коваленко Є. О. Вплив початкових даних задачі паралельного упорядкування з перериваннями на оптимальність розв'язку. *Питання прикладної математичної моделювання*.

тики і математичного моделювання. 2022. Вип. 22. С. 158-167. Режим доступу: <https://doi.org/10.15421/322217>.

REFERENCES

1. Burdyuk V. Ya., Turchyna V. A. (1985). Parallel sequencing algorithms: textbook. Dnipropetrovsk: DSU, 83 p.
 2. Coffman, E. G., Bruno, J. L. (1976). Computer and job-shop scheduling theory. Wiley.
 3. Kovalenko Y. O., Turchyna V. A. (2024) On a partial case of the parallel sequencing problem. *Theoretical and empirical scientific research: concept and trends*, 222-226. Mode of access: <https://doi.org/10.36074/logos-02.02.2024.044>.
 4. Kozin, I. V., Narzullaev, U. H., Allomov, Z. K. (2023). The shuffle frog leaping algorithm for the production location problem. *Computer Science and Applied Mathematics*, 1, 11–18. <https://doi.org/10.26661/2786-6254-2023-1-02>.
 5. Dolotov I. O. Guk N. A. (2023). Clustering of a weighted webgraf with the usage of modularity. *Problems of applied mathematics and mathematic modeling* 23, 45–52. Mode of access: <https://doi.org/10.15421/322305>.
 6. Semeniuta M. F. (2021). Combinatorial Configurations in the Definition of Antimagic Labelings of Graphs. *Cybernetics and systems analysis*, 57(2), 196–204. Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00344-y>.
 7. Nakonechna T. V. (2024). On the influence of interruptions in the jobs execution in project management. *Problems of applied mathematics and mathematical modeling*, 24, 151-158. Mode of access: <https://doi.org/10.15421/322416>.
- Turchyna V. A., Kovalenko Y. O. (2022). The influence of the parallel sequencing problem with interruptions initial data on the solution optimality. *Problems of applied mathematics and mathematical modeling*, 22, 158-167. Mode of access: <https://doi.org/10.15421/322217>.

Received 05.03.2025.

Accepted 07.03.2025.

On improving approximate solutions to parallel sequencing problem and one of its generalizations model analysis

One of the current research directions in scheduling theory concerns those problems in which interruptions are allowed during the job execution. Scheduling theory problems are widely used in modeling work, particularly production, processes related to planning. To solve them, methods and algorithms have been developed that allow optimizing the relevant processes depending on specific needs, such as reducing the total time to complete jobs, minimizing the resources involved, completing the entire amount of jobs within the specified time frame, or reducing the time delay. One of such problems implies a given finite set of jobs, the order of execution of which is subject to technological restrictions. This set of jobs must be performed using the available amount of resources in the shortest time period. In mathematical formulation, such an applied problem can be reduced to the vertices' of a digraph parallel sequencing problem.

The sequencing problems are mostly NP-hard, but their subclasses have been identified, for the solution of which exact algorithms of polynomial complexity have been developed. The use of such known algorithms of polynomial complexity when solving sequencing problems

for arbitrary graphs with equal vertex weights generally leads to approximate solutions. Occasionally it is possible for the objective function value to increase almost twice, compared to the optimal one. The possibility of improving approximate solutions to these problems by allowing job interruptions is investigated.

One generalization of the parallel sequencing problem corresponds to a model where the limit on the number of vertices that can be placed at fixed locations is given by the corresponding vector. A modification of the algorithm for solving this generalized problem is proposed for cases when the corresponding graph is regular and belongs to the subclass of complete bipartite graphs.

Коваленко Євген Олександрович – аспірант кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Турчина Валентина Андріївна – к.ф.-м.н., доцент, завідувачка кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Kovalenko Yevhen – Postgraduate student of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Cybernetics of Oles Honchar Dnipro National University.

Turchyna Valentyna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Cybernetics of Oles Honchar Dnipro National University.

В.А. Корнута, Ю.В. Катамай, Б.І. Меренко,

І.Я. Дмитрів, Н.Т. Іванців, О.В. Корнута, А.В. Дячук

**МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКІВ І ПОМИЛОК В РОБОТІ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ
НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ**

Анотація. Сучасні інтелектуальні автоматизовані системи (ІАС) забезпечують високий рівень автоматизації та покращують ефективність виробничих процесів в нафтогазовій галузі. Водночас функціонування таких систем супроводжується ризиками та ймовірністю помилок, що можуть призводити до фінансових втрат та аварійних ситуацій. У статті розглянуто основні методи зменшення ризиків та помилок у роботі ІАС нафтогазової галузі, зокрема, вдосконалені підходи до верифікації та тестування. Досліджено застосування формальних та неформальних методів верифікації, а також модульного, інтеграційного та тестування на основі властивостей у ІАС. Визначено підходи для вимірювання структурного покриття та оптимізації процесу тестування. Отримані результати спрямовані на зменшення ймовірності помилок та забезпечення відповідності системи галузевим стандартам.

Ключові слова: інтелектуальні автоматизовані системи, нафтогазова галузь, верифікація, перевірка покриття, тестування.

Постановка проблеми. Сучасні інтелектуальні автоматизовані системи (ІАС) відіграють важливу роль у розвитку нафтогазової галузі, забезпечуючи ефективність та безпеку ключових виробничих процесів. Завдяки їх використанню досягається підвищення продуктивності, оптимізація видобутку та транспортування вуглеводнів, а також мінімізація впливу на довкілля. Водночас функціонування таких систем супроводжується певними ризиками та ймовірністю виникнення помилок, які можуть призводити до значних фінансових втрат, порушення безпеки та аварійних ситуацій.

Особливості роботи в нафтогазовій галузі, такі як екстремальні умови експлуатації, великий обсяг даних та високий рівень автоматизації, потребують застосування спеціалізованих підходів до управління ризиками. Ефективне зменшення ймовірності помилок можливе завдяки впровадженню сучасних методів аналізу ризиків, превентивного обслуговування обладнання, а також алгоритмічних підходів до виявлення та прогнозування відхилень у роботі систем. У цій статті розглянуто основні методи зменшення ризиків і помилок у роботі ІАС, що застосовуються в нафтогазовій галузі.

© Корнута В.А., Катамай Ю.В., Меренко Б.І.,

Дмитрів І.Я., Іванців Н.Т., Корнута О.В., Дячук А.В., 2025

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ключову роль у зменшенні ризиків і помилок в інтелектуальних автоматизованих системах (ІАС), особливо в складних галузях, таких як нафтогазова **промисловість** відіграє тестування та вибір і оцінка тестових кейсів. Ефективний набір тестів повинен виявляти програмні помилки, які не можуть бути виявлені іншими тестовими кейсами [1]. Для покращення розподілу тестових ресурсів можна запропонувати використовувати верифікацію та перевірку покриття коду як показник ефективності та повноти тестування. Ці методи забезпечують перевірку коректності, надійності та повноти системи ще до її впровадження або під час її роботи. Так, верифікація допомагає виявленню помилок на ранніх етапах (дозволяє виявити помилки в алгоритмах, коді або логіці системи ще до її впровадження, зменшуючи ризики дороговартісних збоїв), перевіряє відповідність галузевим нормам і стандартам безпеки, допомагає перевірити, як система працює в екстремальних умовах або за несприятливих обставин, використовує скрипти для перевірки функціоналу і продуктивності системи в різних сценаріях. Зокрема, в нафтогазовій галузі використовується верифікація програмного забезпечення для контролю тиску, температури чи витрат у трубопроводах, перевірка алгоритмів ШІ, для прогнозування несправностей обладнання тощо.

Покриття забезпечує, щоб усі можливі шляхи виконання, сценарії використання або частини системи були протестовані. А саме, виявляє частини коду, логіки або функціоналу, які можуть залишитися невиконаними без повного покриття, гарантує, що немає недокументованих або нефункціонуючих частин системи та допомагає забезпечити коректну реакцію системи на помилки, наприклад, аварійне відключення обладнання або відмову сенсорів, дає змогу ідентифікувати і покращити слабкі місця системи.

Верифікація - це сімейство методів, метою яких є переконатися, що система задовольняє певні вимоги користувача. Процес верифікації є вирішальним елементом у розробці керуючого програмного забезпечення та відіграє ключову роль у забезпеченні надійності, функціональності та продуктивності систем автоматизації [2, 3]. Верифікація може бути формальною (містить такі методи, як перевірка моделі [4] і теорію диспетчерського керування [5]), або неформальною (містить такі методи, як тестування [6]).

Формальна верифікація виконується на рівні моделі, а не на рівні системи, що означає, що модель системи має бути побудована. Модель системи створюється за допомогою формальної мови, і це зазвичай передбачає певний рівень абстракції, оскільки побудувати модель, яка повністю повторює поведінку системи, яку вона моделює, зазвичай неможливо. Замість цього практичним компромісом є моделювання та офіційна перевірка певних аспектів системи, а також застосування тестування для перевірки більших частин або повних систем [7].

На відміну від формальних методів, таких як перевірка моделі, тестування рідко буває вичерпним, оскільки зазвичай досить дорого охопити розумну кількість простору для введення. Це означає, що неможливо довести відсутність помилок, але при цьому можна збільшити довіру до системи. За допомогою відповідних методів тестування, що

супроводжуються критеріями покриття, тестування можна масштабувати та використовувати для складних промислових систем [8].

Крім того, тестування може бути застосоване до програми в умовах, в яких вона передбачається виконувати, наприклад, на цільовому обладнанні або з цільовою операційною системою та драйверами [9].

Мета дослідження - вдосконалення підходів до верифікації та тестування інтелектуальних автоматизованих систем, що використовуються в нафтогазовій галузі для зниження ризиків, підвищення надійності та забезпечення відповідності сучасним стандартам безпеки.

Викладення основного матеріалу дослідження. Верифікація інтелектуальних автоматизованих систем - це процес, який гарантує, що конкретні компоненти або підсистеми відповідають своїм проектним вимогам. Для верифікації ІАС можна застосовувати як формальні методи, так і тестування. Модель поведінки побудована з автоматичних переходів і операцій, що складаються з формальної та не-формальної частин. Такий вибір моделі дозволяє використовувати формальні методи до планування моделі, а також перевірити поточну модель, а саме, її драйвери, інтерфейси, симуляції тощо. Приклад операції сканування вікна з використанням С-подібної мови ROS (Robot Operating System) наведено нижче:

```
operation: scan_box
deadline: 10 seconds
pre: start_scan_box -> precondition
g: scan_req_state == initial && -> planning guard
    scan_req_trigger == false &&
box_is_scanned == false
gr: true -> running guard
a: [scan_req_trigger <- true] -> planning actions
ar: [] -> running actions
post: complete_scan_box -> postcondition
g: true -> planning guard
gr: scan_req_state == succeeded -> running guard
a: [scan_req_state <- initial, -> planning actions
    scan_req_trigger <- false,
box_is_scanned <- true]
ar: [] -> running actions
```

Формальні методи. Одними з найважливіших груп властивостей, які варто перевіряти, є властивості безпеки (властивості «життєздатності»). При дотриманні властивостей безпеки ніколи не повинно статися чогось поганого, наприклад, одночасного доступу до спільної зони, неправильного порядку складання або досягнення забороненого стану. З іншого боку, властивості життєздатності декларують, що врешті-решт станеться щось хороше, наприклад, завжди можна досягти бажаного цільового стану [10], не застрягнувши в динамічному взаємоблокуванні. Специфікації безпеки

мають скінчену кількість контрприкладів, тоді як специфікації життєздатності – нескінченну.

Замість перевірки того, що модель відповідає специфікації, можна застосувати підхід синтезу для автоматичного обчислення правил керування. Для розробки ІАС можна використовувати теорію наглядного контролю [5] для прямого обчислення додаткових обмежень для системи з використанням техніки вилучення захисту [11], яка гарантує, що згенерований план не буде у жодному з небажаних станів. Така техніка використовується для вдосконалення моделі планування на основі специфікацій високого рівня.

Іншим формальним методом, який можна застосувати до моделі планування, є перевірка моделі, яка використовується для відповіді на таке запитання: чи задовольняє модель системи заданим властивостям? У перевірці моделі [12] тимчасові властивості перевіряються шляхом дослідження простору станів з використанням набору початкових станів і переходів. Тимчасові властивості виражаються за допомогою розширень логіки висловлювань, наприклад лінійної часової логіки [13]. Лінійна часова логіка містить тимчасові оператори, такі як «наступний стан» (O), «завжди» (\square), "зрештою" (\diamond) та «до» (U). Наприклад, формула $\square(x \rightarrow O y)$ виражає, що для всіх досяжних станів завжди вірно, що якщо x зберігається в поточному стані, у буде зберігатися в наступному стані.

Щоб скористатися перевагами методів розв'язання задачі задовільності пропозицій, модель і специфікації можна сформулювати як задачу з обмеженим розміром. До такого формулювання можна застосувати метод перевірки обмеженої моделі [14], де границя визначає, за скільки кроків від початкового стану шукати контрприклад. Подібно до ітераційного кодування переходів, скасовані специфікації лінійної часової логіки кодуються до межі, яка представлена поточною ітерацією. Якщо задача розв'язується, це означає, що специфікація була порушена, і отримане присвоєння може бути використане для реконструкції контрприкладу. Розглянемо, наприклад, властивість, яку можна перевірити на моделі планування роботи робота: завжди, після того, як сканер отримує команду на сканування, а коробка не сканується, коробку все одно слід сканувати. У часовій логіці це записується так:

$$((scan_req_trigger \wedge \neg box_is_scanned) \rightarrow \diamond box_is_scanned)$$

Слабкою стороною таких систем моделювання шляхом розділення поведінки планування та виконання є те, що не забезпечується загального способу уникнення тупикових ситуацій під час виконання. Хоча на моделі планування можна виконати вилучення захисту та перевірку моделі, перевірка працюючої моделі, а також зв'язку, інтерфейсів, драйверів тощо залежить саме від дій тестування.

Модульне тестування . Щоб мати можливість переконатися, що певний код поводитиметься так, як це було задумано розробником, звичайною практикою є тестування такого коду за допомогою написаного вручну модульних тестів [15]. Такі тести призначені для верифікації чи виявлення хибності коду для обраного та повністю визначеного вузла набору вхідних даних, а також перевірки раніше відомих проблемних наборів вхідних даних, які спричиняли помилки в минулому.

У методології тест-орієнтованої розробки модульні тести зазвичай пишуться перед фактичним кодом, що означає, що тести можуть бути невдалими, доки розробники не реалізують код правильно. Кожний модуль тестується незалежно в ізольованому середовищі, щоб переконатися у відсутності залежностей у коді.

Модульне тестування зосереджується виключно на аспектах, які є важливими для блоку, який досліджується. Цей підхід надає розробнику можливість вносити зміни у вихідний код, не впливаючи на інші модулі чи загальну функціональність програми. Наприклад, під час розробки ІАС доцільно провести наступне модульне тестування: симуляції (симуляція отримує команди та моделює поведінку ресурсу, як очіувалося); функції (функції та алгоритми, що керують ІАС, працюють як очіувалося); комунікація (при обробленні ресурсів їхні відповідні інтерфейси та апаратне забезпечення обмінюються інформацією, як очіувалося, використовуючи правильні типи повідомлень, обробка всіх полів повідомлень, обробка команд та вчасна відповідь тощо); драйвери (драйвери ресурсів здатні керувати обладнанням, як очіувалося).

Для модульного тестування поведінки симуляторів, інтерфейсів і драйверів під час розробки ІАС пропонується створити та використовувати прості фіктивні вузли. Ці вузли дозволяють тестувати конкретні команди та перевіряти очікувані відповіді від симуляторів, інтерфейсів і драйверів. Якщо їх поведінка відповідає очікуваним результатам для перевірених вхідних даних, тестування можна продовжувати. В іншому випадку треба змінювати компоненти, поки не буде досягнена бажана продуктивність.

Інтеграційне тестування. Коли кожен блок у системі буде перевірено в задовільній кількості разів, можна переходити до оцінки більших конфігурацій системи та взаємодії компонентів за допомогою інтеграційного тестування. Інтеграційне тестування виконується поетапно, коли компоненти поступово інтегруються, а потім тестуються як група. В ІАС інтеграційне тестування виконується під час віртуального введення в експлуатацію, де цифровий двійник (який по суті є віртуальним представленням відповідного фізичного об'єкта) забезпечує спільну основу для тестування зв'язку, контролерів, симуляторів і драйверів для всіх ресурсів. Після незалежної перевірки таких блоків їх взаємодія та сукупна функціональність перевіряються разом шляхом інтеграції контролера і моделі поведінки та тестування конкретних сценаріїв.

Нарешті, повна модель включається в тест, який містить завантажену поточну модель та автоматичні переходи. Такі інтеграційні тести потенційно виявлять, чи щось поводить неправильно в конкретному випадку, визначеному користувачем.

Тестування на основі властивостей. На відміну від модульного тестування, яке перевіряє систему на окремі тестові випадки, та інтеграційного тестування, яке перевіряє взаємодію одиниць в окремих випадках сценарію, тестування на основі властивостей [16] перевіряє відповідності властивостей нефункціональним вимогам. Коли знайдено вхід, який порушує властивість, можна використати такі методи, як скорочення, щоб автоматично зменшити його до мінімального контрприкладу. На практиці такий контрприклад є дуже корисним, оскільки він прямо вказує на причину та яким

чином властивість порушено, надаючи розробникам точну інформацію про те, як змінити програму.

Природа такого тестування зазвичай є випадковою [17] і без знання попередніх невдалих тестових прикладів або початкових значень таке тестування може пропустити конкретні невдалі крайні випадки. Крім того, тестування спостерігає лише за кінцевим набором виконань кінцевої програми, оскільки зазвичай дуже дорого або навіть неможливо перевірити код для всіх можливих вхідних значень. Таким чином, тестування на основі властивостей найкраще використовувати як доповнення до традиційного модульного тестування.

Щоб перевірити властивості ІАС, варто почати з визначення певних властивостей, які мають зберігатися під час виконання таких тестів, наприклад:

1. Якщо мета полягає в тому, щоб об'єкт сканувався, то врешті об'єкт має бути відскановано.

2. Якщо сканування тричі поспіль не вдається, сканування слід перервати, інакше сканування об'єкта відбувається повторно.

3. Якщо загалом сканування не вдається п'ять разів, сканування слід припинити, інакше об'єкт сканувати повторно.

Тестування покриття. Вимірювання структурної охоплюваності передбачає кількісну оцінку адекватності процесу тестування та надання розуміння повноти набору тестів. Цього можна досягти, визначивши набір показників покриття, які вказують на ступінь використання системи під час тестування. Наприклад, під час процесу тестування системи на заданий набір вимог можна відслідковувати та кількісно оцінювати частоту та ступінь застосування моделі поведінки. Ця оцінка може запропонувати цінну інформацію про те, як оптимізувати початковий набір тестів і покращити загальну охоплюваність. Використовуючи цей відгук для вдосконалення тестування, можна гарантувати, що система всебічно перевірена на відповідність необхідним стандартам.

Відомий критерій модифікованого покриття умов/рішень [18] не варто безпосередньо застосувати для оцінки охоплення моделей поведінки. Тому ми зосереджуємося на програмі виконання операцій і складаємо огляд різних станів виконання операцій (рис.1):

- Initial: операція не є наступною згідно плану.
- •Disabled: операція є наступною в плані для виконання, але її захист попередніх умов ще не ввімкнено.
- •Executing: захист попередніх умов увімкнено, дії передумови виконуються.
- •Timedout: операція перебувала в стані виконання більше часу, ніж дозволяє її кінцевий термін
- •Failed: операція не виконана через помилку.
- •Completed: захист постумови ввімкнено, і дії післяумови виконуються. Операція успішно завершена.

Таким чином, можна визначити критерії структурної здатності покриття ІАС для набору тестів наступним чином. Кожна запланована операція в моделі поведінки принаймні один раз перебувала у стані Disabled, Executing, Timedout, Failed та Completed.

Кожна операція була включена в план принаймні один раз. Кожен автоматичний перехід виконано принаймні один раз.

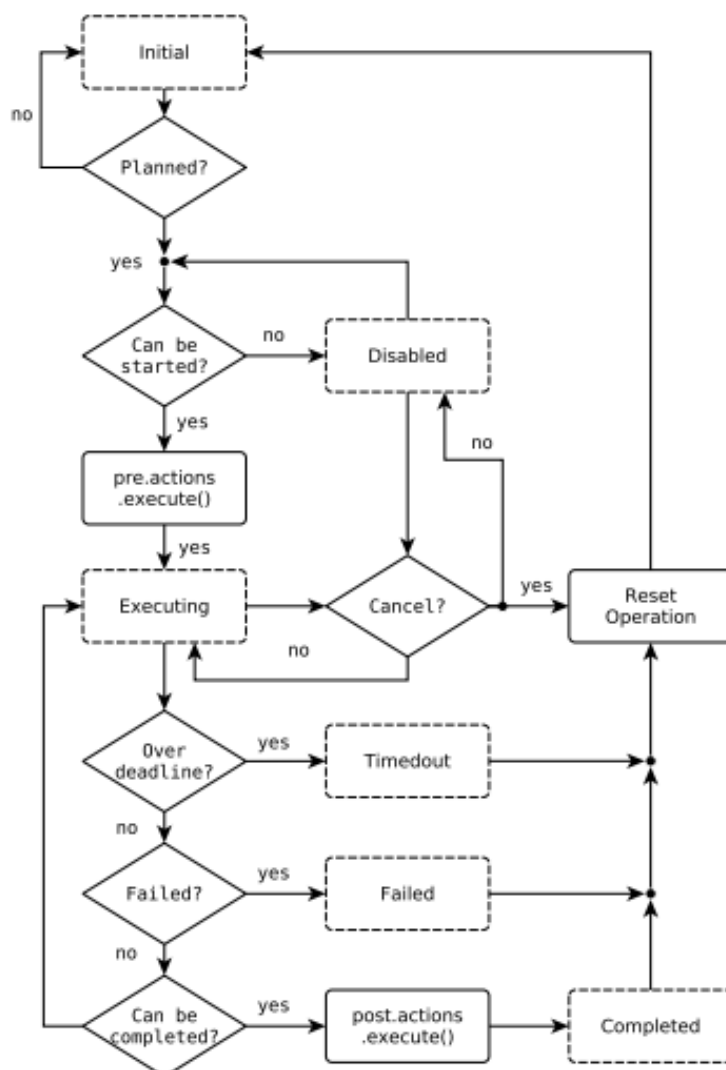


Рисунок 1 - Операції та стани під час виконання програми

Виконання цих критеріїв для набору вимог гарантує, що модель поведінки була здійснена та може використовуватися як перевірка. Як і у випадку з критерієм модифікованого покриття умов/рішень, відповідність вимогам цього критерію не гарантує відсутності дефектів. Однак невиконання цього критерію вказує на те, що певні частини моделі не були достатньо використані, висвітлюючи потенційні проблемні області.

Покращення здатності до покриття є ітеративним процесом. Якщо критерії не відповідають, необхідно повернутися до моделі та визначити пропущені частини, а потім створити спеціальні тестові випадки для їх покриття. Крім того, тестувальнику можна дозволити впливати на вузли моделювання, щоб швидше охопити пропущені аспекти. Після додаткових тестів можна повторно оцінити здатність до покриття та повторити процес, доки не буде досягнуто бажаного рівня покриття.

Покращення покриття є ітеративним процесом. Коли критерії не відповідають, необхідно повернутися до моделі та визначити пропущені частини, а потім створити спеціальні тестові випадки для їх покриття. Крім того, тестувальнику можна дозволити впливати на вузли симуляції, щоб швидше охопити пропущені аспекти. Після додаткових тестів можна повторно оцінити рівень покриття та повторити процес, доки бажаного рівня покриття не буде досягнуто.

Висновки. Результати дослідження підтверджують важливість інтеграції формальних методів і тестування для забезпечення надійності та функціональності ІАС. Формальні методи дозволяють виявити критичні помилки на етапі моделювання, тоді як тестування, зокрема модульне та інтеграційне, забезпечує перевірку коректності роботи системи в реальних умовах. Оцінка структурної охоплюваності допоможе оптимізувати тестові ресурси та підвищити ефективність тестування. Застосування запропонованих підходів сприяє мінімізації ризиків аварій та забезпечує безперебійність функціонування ІАС.

ЛІТЕРАТУРА

1. Cai, Xia & Lyu, Michael. (2005). The effect of code coverage on fault detection under different testing profiles. ACM Sigsoft Software Engineering Notes. 30. 10.1145/1082983.1083288.
2. R. Hametner, B. Kormann, B. Vogel-Heuser, D. Winkler, and A. Zoitl, "Test case generation approach for industrial automation systems," in The 5th International Conference on Automation, Robotics and Applications, 2011, pp. 57–62
3. D. Winkler, R. Hametner, T. Östreicher, and S. Biffel, "A framework for automated testing of automation systems," in 2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2010), 2010, pp. 1–4.
4. E. M. Clarke, E. A. Emerson, and J. Sifakis, "Model checking: Algorithmic verification and debugging," Communications of the ACM, vol. 52, no. 11, pp. 74–84, 200.
5. P. J. Ramadge and W. M. Wonham, "Supervisory control of a class of discrete event processes," SIAM J. Control Optim., vol. 25, no. 1, pp. 206–230, 1987.
6. A. Orso and G. Rothermel, "Software testing: A research travelogue (2000–2014)," in Future of Software Engineering Proceedings, 2014, pp. 117–132.
7. I. Buzhinsky, C. Pang, and V. Vyatkin, "Formal modeling of testing software for cyber-physical automation systems," in 2015 IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA, IEEE, vol. 3, 2015, pp. 301–30.
8. J. Zander, I. Schieferdecker, and P. J. Mosterman, Model-based testing for embedded systems. CRC press, 2017.
9. X. Rival and K. Yi, Introduction to static analysis: an abstract interpretation perspective. Mit Press, 2020.
10. A. Sistla, "Safety, liveness and fairness in temporal logic," Formal Aspects of Computing, vol. 6, Sep. 1999.
11. M. Dahl, K. Bengtsson, M. Fabian, and P. Falkman, "Guard extraction for modeling and control of a collaborative assembly station," IFAC Papers On Line, vol. 53, no. 4, pp. 223–

228, 2020, 15th IFAC Workshop on Discrete Event Systems WODES 2020 — Rio de Janeiro, Brazil, 11- 13 November 2020, issn: 2405-8963.

12. O. Grumberg, E. Clarke, and D. Peled, Model checking, 1999.

13. A. Pnueli, “The temporal logic of programs,” in 18th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (sfcs 1977), IEEE, 1977, pp. 46–57.

14. A. Biere, A. Cimatti, E. Clarke, and Y. Zhu, “Symbolic model checking without bdds,” in International conference on tools and algorithms for the construction and analysis of systems, Springer, 1999, pp. 193–207.

15. P. Runeson, “A survey of unit testing practices,” IEEE software, vol. 23, no. 4, pp. 22–29, 2006.

16. G. Fink and M. Bishop, “Property-based testing: A new approach to testing for assurance,” SIGSOFT Softw. Eng. Notes, vol. 22, no. 4, pp. 74–80, Jul. 1997, issn: 0163-5948.

17. K. Claessen and J. Hughes, “Quickcheck: A lightweight tool for random testing of haskell programs,” SIGPLAN Not., vol. 35, no. 9, pp. 268– 279, Sep. 2000, issn: 0362-1340.

18. Hayhurst and D. Veerhusen, “A practical approach to modified condition/decision coverage,” in 20th DASC. 20th Digital Avionics Systems Conference (Cat. No.01CH37219), vol. 1, 2001, 1B2/1–1B2/10 vol.1.

REFERENCES

1. Cai, Xia & Lyu, Michael. (2005). The effect of code coverage on fault detection under different testing profiles. ACM Sigsoft Software Engineering Notes. 30. 10.1145/1082983.1083288.

2. R. Hametner, B. Kormann, B. Vogel-Heuser, D. Winkler, and A. Zoitl, “Test case generation approach for industrial automation systems,” in The 5th International Conference on Automation, Robotics and Applications, 2011, pp. 57–62

3. D. Winkler, R. Hametner, T. Östreicher, and S. Biffel, “A framework for automated testing of automation systems,” in 2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETF A 2010), 2010, pp. 1–4.

4. E. M. Clarke, E. A. Emerson, and J. Sifakis, “Model checking: Algorithmic verification and debugging,” Communications of the ACM, vol. 52, no. 11, pp. 74–84, 200.

5. P. J. Ramadge and W. M. Wonham, “Supervisory control of a class of discrete event processes,” SIAM J. Control Optim., vol. 25, no. 1, pp. 206–230, 1987.

6. A. Orso and G. Rothermel, “Software testing: A research travelogue (2000–2014),” in Future of Software Engineering Proceedings, 2014, pp. 117–132.

7. I. Buzhinsky, C. Pang, and V. Vyatkin, “Formal modeling of testing software for cyber-physical automation systems,” in 2015 IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA, IEEE, vol. 3, 2015, pp. 301–30.

8. J. Zander, I. Schieferdecker, and P. J. Mosterman, Model-based testing for embedded systems. CRC press, 2017.

9. X. Rival and K. Yi, Introduction to static analysis: an abstract interpretation perspective. Mit Press, 2020.

10. A. Sistla, "Safety, liveness and fairness in temporal logic," *Formal Aspects of Computing*, vol. 6, Sep. 1999.
11. M. Dahl, K. Bengtsson, M. Fabian, and P. Falkman, "Guard extraction for modeling and control of a collaborative assembly station," *IFAC Papers On Line*, vol. 53, no. 4, pp. 223–228, 2020, 15th IFAC Workshop on Discrete Event Systems WODES 2020 — Rio de Janeiro, Brazil, 11- 13 November 2020, issn: 2405-8963.
12. O. Grumberg, E. Clarke, and D. Peled, *Model checking*, 1999.
13. A. Pnueli, "The temporal logic of programs," in *18th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (sfcs 1977)*, IEEE, 1977, pp. 46–57.
14. A. Biere, A. Cimatti, E. Clarke, and Y. Zhu, "Symbolic model checking without bdds," in *International conference on tools and algorithms for the construction and analysis of systems*, Springer, 1999, pp. 193–207.
15. P. Runeson, "A survey of unit testing practices," *IEEE software*, vol. 23, no. 4, pp. 22–29, 2006.
16. G. Fink and M. Bishop, "Property-based testing: A new approach to testing for assurance," *SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, vol. 22, no. 4, pp. 74–80, Jul. 1997, issn: 0163-5948.
17. K. Claessen and J. Hughes, "Quickcheck: A lightweight tool for random testing of haskell programs," *SIGPLAN Not.*, vol. 35, no. 9, pp. 268– 279, Sep. 2000, issn: 0362-1340.
18. Hayhurst and D. Veerhusen, "A practical approach to modified condition/decision coverage," in *20th DASC. 20th Digital Avionics Systems Conference (Cat. No.01CH37219)*, vol. 1, 2001, 1B2/1–1B2/10 vol.1.

Received 10.03.2025.

Accepted 13.03.2025.

Methods for reducing risks and errors in the operation of oil and gas industry intellectual automated systems

Modern intelligent automated systems (IAS) provide a high level of automation and improve the efficiency of production processes in the oil and gas industry. At the same time, the operation of such systems is accompanied by risks and the probability of errors, which can lead to financial losses and emergencies. The article considers the main methods for reducing risks and errors in the operation of IAS in the oil and gas industry, in particular, improving approaches to verification and testing. The application of formal and informal verification methods and modular, integration, and property-based testing in specific IAS systems is investigated. Approaches for measuring structural coverage and optimizing the testing process are identified. The results obtained are aimed at reducing the probability of errors and ensuring the system's compliance with industry standards. The study's results confirm the importance of integrating formal methods and testing to ensure the reliability and functionality of the IAS. Formal methods allow you to detect critical errors at the modeling stage, while testing, in particular modular and integration, ensures the correctness of the system's operation in real conditions. The application of the proposed approaches helps minimize the risks of accidents and ensures the smooth functioning of the IAS.

Keywords: intelligent automated systems, oil and gas industry, verification, coverage verification, testing

Корнута Володимир - кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення, Івано-Франківський національний технічний університету нафти і газу.

Катамай Юлія - аспірантка, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Меренко Богдан - аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Дмитрів Ігор - аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Іванців Назарій - аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Корнута Олена - кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки, Івано-Франківський національний технічний університету нафти і газу.

Дячук Андрій - аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Kornuta Volodymyr - Ph.D, Associate Professor of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Katamai Yuliia - PhD student, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Merenko Bogdan - PhD student, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Dmytriv Ihor - PhD student, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Ivantsiv Nazar - PhD student, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Kornuta Olena - Ph.D, Associate Professor of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Diachuk Andriy - PhD student, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Hr. Larionov, Yu. Zemliana, V. Khvorostian, Yu. Bulych

**METHOD OF SEQUENTIAL APPROXIMATION USING TO DETERMINE
THE METAL-RESIN ANCHOR LONGITUDENAL FORCES
DISTRIBUTION DURING ITS PULLOUT TESTING**

Abstract. The results of SEPT investigating, as a rule, are general parameters as cohesion and shear strength and system rigid. The parameters achieved without taking into account fixed compound parameters and efforts parameter distribution were not analysing. Attempt to obtain the analytical form distribution at “anchor bar-fixing compound” and “fixing compound-rock” contacts has made. Present paper devoted to comparison the solving of generalized task of M.E. Zhukovskiy specification with taking into account the specialty of anchor rebar- fixing compound-rock system with the parameters obtained with finite element method (FEM). Obtained results demonstrate correspondence to viewpoints of metal resin anchor loading mechanism. Simplified formulas of efforts dependences in fixing compound shell vs construction system parameters were obtained. Do results comparison with ones, what obtained with FEM method. Graphic dependencies are presented. Conclusions about main parameters of efforts along resin anchor components distributions done. Conclusions on using effectiveness of proposed method for analysis SEPT testing parameters obtaining made.

Keywords: sequential approximation method, SEPT investigating, metal-resin anchor longitudinal forces distribution.

1. Introduction. Fastening of mining works with metal-polymer anchors (MA) has become widespread in Ukraine. A departmental program has been developed to involve mining enterprises in the use of MA for opens fastening in mining. However, this type of fastening also has its drawbacks. These, in the conditions of Ukraine, include: irregular provision of components for anchor fastening (AF), deviations from the design requirements for fastening technology. The irregular supply of components, and in particular ampoules with a fixing compound (FC), in turn leads to a level of adhesion to the surface of the anchor hole that does not correspond to the design. This situation leads to an unsatisfactory level of fastening of both the roof and the bottom of open in the working, which does not provide the required level of mixing of the FC, and accordingly cannot provide the design adhesion strength. The strength of the adhesion of the fixed MA of roof is a fundamental parameter that determines the effectiveness of fastening not only an individual anchor, but also the entire system as a whole [1-3]. This is especially important when intensification of mining operations [4-6], and in conditions of weak and water-logged rocks [7]. The stronger the adhesion, the shorter the working zone of the anchor and the longer the zone of full resistance,

over which the anchor resists the movements of the roof with the greatest possible load of the anchor bar [8]. To check the strength of the adhesion of the rebar in the borehole, in practice, pulling out the fixed MA under its operating conditions is used. To check the properties of the FC, taking into account the irregularity of the provision of FC ampoules, the standard fixed anchor is pulled out. Taking into account the complexity of the processes of interaction of the FC with the surface of the borehole, existing mathematical models do not lead to the obtaining of analytical expressions for the parameters of the stress-strain state (SSS) in the system "anchor bar-FC-rock". The purpose of the research presented in the article is to obtain in analytical form the parameters of the SSS in the system "anchor bar-FC-rock", which will allow to carry out research on the parameters influence on the strength of rebar fixation in the borehole, and accordingly will allow to carry out an assessment of the sensitivity of the risk function to the parameters.

2. Methods. For an anchor with fixation by polymer FC, the anchoring effect is ensured by its adhesion to the rock, and the adhesion strength can easily exceed the strength of a steel anchor bar [9]. To eliminate such situations, the rebar (це є анкерна штанга, а анкер це є зафіксована анкерна штанга з допомогою фіксуючої суміші) is specially fixed with short-length ampoules of FC. This type of testing is called SEPT (Shot Encapsulated Pull Test) and is an internationally recognized method for measuring the anchoring efficiency or adhesion properties of fully filled anchors (FFA) of the roof. Standard SEPT equipment is presented in figure 1 [10].

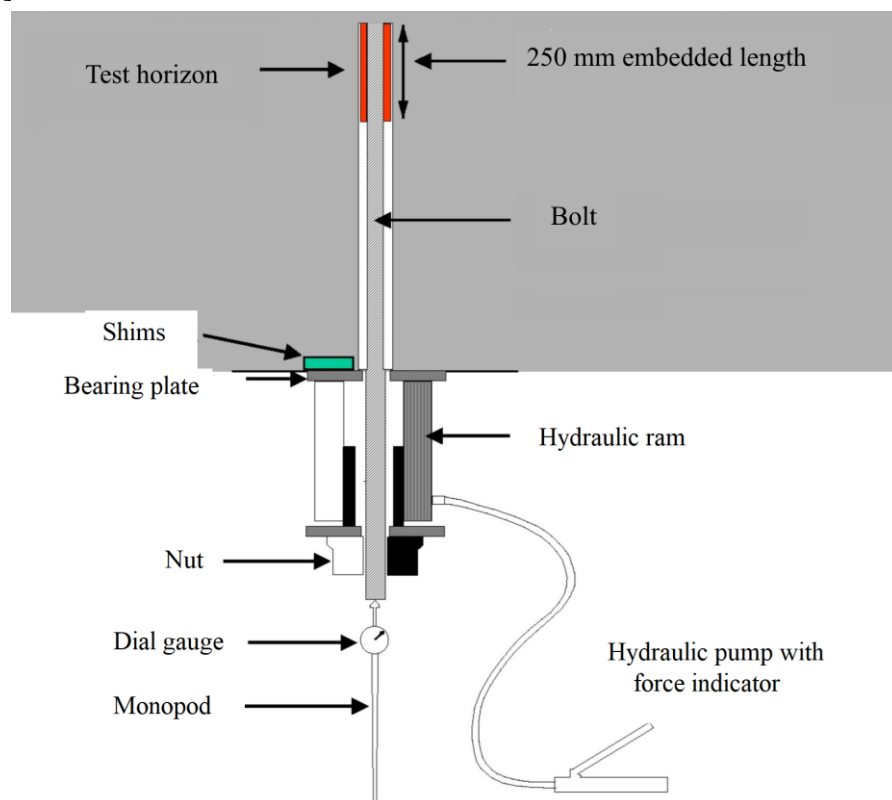


Figure 1 - Equipment for conducting SEPT tests

The load transfer capacity is a factor that determines the strength of the anchor and

ensures the effectiveness of the fastening of the rock mass. In [11], its definition is given as the ratio of the change in load to the length of the section along which the anchor is fixed. In [12], this capacity is defined as the maximum value of the stresses acting on a unit area of the roof anchor surface. More effective fastening systems are characterized by a high load transfer capacity, i.e. with a high load at small displacements.

Two models that relate to the nature of load transfer in FFA have been operating for 30 years. One of them is associated with the transfer of nonlinear loads in pull-out tests performed in laboratory and natural conditions. An alternative model is used to transfer linear loads observed in field studies, but under the condition that the transfer of loads was initiated by the separation of the roof layer. It is believed [13] that these two methods differ only in the way the anchor bar is loaded. For the convenience of performing the axial tensile load test, the free end of the FFA is usually applied using a hydraulic jack. At the same time, the reaction of the jack causes a compressive load on the rocks surrounding the anchor, acting on the surface in the vicinity of the borehole. It is argued [14] that the most likely mechanism of loading of the roof anchor in real conditions is caused by delamination and movement of the rebar in opposite directions to the movement of the adjacent layers. It is argued that the analysis and interpretation of the results obtained in pullout tests must be carried out very carefully, since there is a tendency to overestimate the level of support compared to that which should be proposed for rock support by load transfer and restraint. Under SEPT testing, the adhesion factor (adhesion strength), shear strength and stiffness of the system can be calculated by the formulas:

- adhesion strength [kN/mm]

$$GP = \frac{F}{l}; \quad (1)$$

- shear strength [MPa]

$$\tau = \frac{F}{\pi dl}; \quad (2)$$

- stiffness of the system [kN/mm]

$$K = \frac{\Delta F}{\Delta D}, \quad (3)$$

where F – force causing the anchor to move out of the borehole, kN; ΔF – changes in force magnitude (typically from 20 to 80 kN); ΔD – changes in the magnitude of deformations caused by changes in forces, mm (figure 2) [10]; l – length of the fixed section of the anchor (usually the working section is 250 mm); d - hole diameter, [mm].

The key to using these relationships is that the shear of the anchor bar (AB) must occur at the contact surface “FC - AB” or “FC - rock”. In weak roof rocks, the contact surface “FC - rock” controls the shear mechanism. If the rocks are stronger, the clutch failure may occur at the contact surface “FC - AB”. In the case where shear does not occur and the applied forces exceed the shear strength, equation (2) can be used to calculate the shear stresses for the applied forces, and the stiffness of the system can be calculated using formula (3) [10]. Satisfactory anchoring quality, at which the anchor capacity is equal to or significantly

exceeds the yield strength of the AB material, was determined in SEPT testing by minimal movements (high bond stiffness).

Unsatisfactory anchoring quality is characterized by significant shear movements of the rebar and the pullout loads do not exceed the yield strength of the rebar material [15]. It is stated [16] that the load distribution during anchor pullout is determined by the ratio of the elastic modulus of the FC (ER) to the elastic modulus of the roof rocks (ERR). In the case when: $ER/ERR > 10$ - the load distribution is linear, and when $ER/ERR < 10$ - the load distribution is nonlinear.

The nature of the load distribution can now be determined using an instrument anchor (IA). An IA can be used to measure the loads on the anchor that arise during various mining operations in the mine. These anchor loads are compared with the yield loads [17], which allows determining the optimal design of the mine roof fastening system (anchor length and distance between them). Another way to design a roof-to-roof anchor system is to calculate the total stress (axial bending stress) for each measurement section [12]. If the total stress (along the measurement line) exceeds the maximum allowable stresses, then subsequent measurements can be made only after changing the parameters to reduce the stresses in the anchor, namely: reducing the anchor spacing, increasing the number of anchors in a row; or increasing the diameter of the anchor rods. But there are certain difficulties in this way.

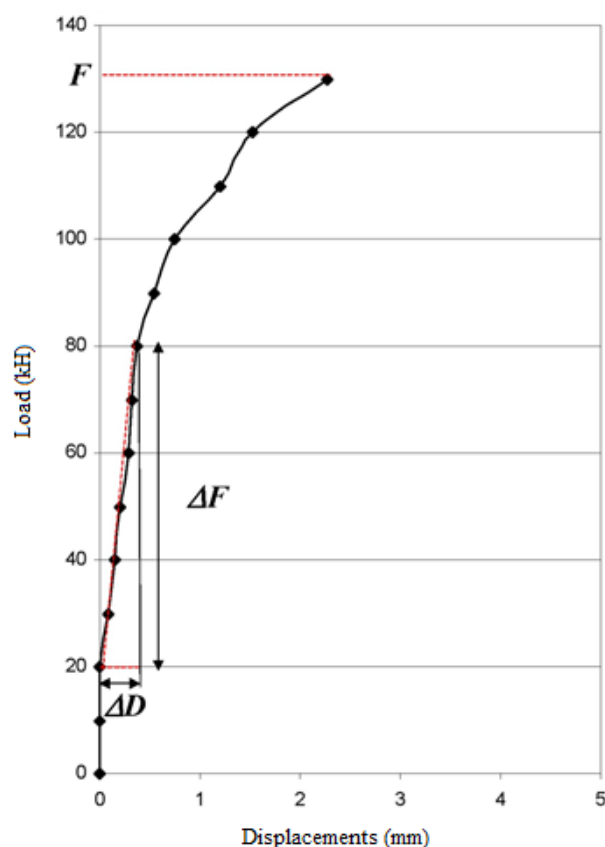


Figure 2 - Typical view of the results of pulling out short anchors

Although instrumental anchors can provide information about the distribution of axial and bending loads along it, their use has the following disadvantages [17]:

- since the instrument anchor (IA) вже було позначене вище. IA has samples along its length, their presence can lead to incorrect determination of the cross-sectional area;
- the values of axial and bending loads can reach maximums in the intervals between measurement sections and thus will not be measured (recorded);
- centering of strain gauges is critical for obtaining reliable results;
- sensor failure may be the result of a break in the connecting conductors or excessive loads and may lead to incorrect reading of one or more axial load values [18].

Thus, an urgent scientific problem is to determine the distribution of forces along the anchor by analytical methods, for example, by solving the generalized problem of M.E. Zhukovsky.

In work [19], the solution of the classical problem of M.E. Zhukovsky on the distribution of tensile forces in a screw pair rock - screw (anchor bar) [20] was used to study the distribution of tensile forces. As the analysis of the results of the solution of the problem showed, the greatest load is experienced by several turns in the vicinity of the free surface within which the load forces were distributed. The absence of a fixing mixture layer loading in the considered scheme did not allow the full use of the obtained results to clarify the distribution of forces at the contact of the rock and the resin-metal-anchor (RMA).

The purpose of the study presented in the article is to obtain in analytical form the parameters of the SSS in the system "AB-FC-rock", which will allow to carry out research on the influence of parameters on the strength of anchor rebar fixation in the borehole.

In connection with the above, to solve the problem of force distribution on the contact surfaces of this scheme, it is possible to apply with certainty the solution of the generalized problem of M.E. Zhukovsky [21] (figure 3). Using a modification of the generalized problem of M.E. Zhukovsky, the parameters of the SSS in the body of the FC shell [21,22] are obtained. The obtained solution, which is difficult to calculate, is reproduced in a more convenient form using the method of successive approximation (MSA), revealing the patterns of the influence of the initial parameters and in particular: the magnitude of the preload q [Pa], the diameters of the anchor bar and the borehole d_a , d_{vt} , [m], and their elastic moduli E_a , E_{vt} [Pa], the leads of thread h_a , h_{vt} [m], and the length of the rebar fixing section l [m], on the magnitude of the average integral value of the forces in the shell from the FC.

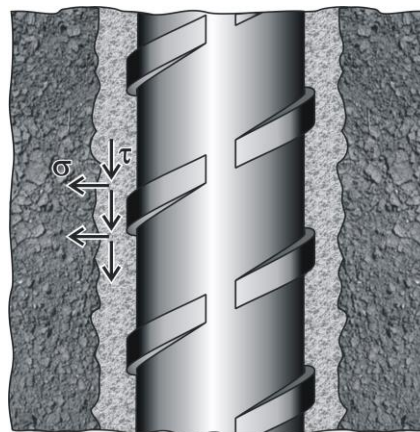


Figure 3 - Load diagram of RMA fixation in a borehole. Where σ is the compressive stress of the anchor bar in the borehole [Pa]; τ is the shear stress in the FC shell [Pa]

According to [21], the right rod reflects the body of the anchor rod, the middle one – the body of the sleeve, i.e. the shell of the FC, and the left rod – the massif of rocks (figure 4). The pitches in which the rods touch, reflect the turns on the surface of the anchor rebar, the shell of the FC and the rock, respectively. The maximum number of turns of the thread is hereinafter denoted by the numbers n and n_1 . The turns are numbered from bottom to top: (0), (1), ..., (n), and the corresponding fields between them: 1, 2, ..., n . The sought forces on the turns of the anchor bar and the sleeve are denoted as p_0, p_1, \dots, p_n [Pa], and on the turns of the FC shell and the rock – t_0, t_1, \dots, t_n [Pa]. In the following, the anchor field will be understood as the part of the body located between two turns.

As in [14], for the forces in the k -th field of the anchor body we have the expression:

$$s_k^a = Q - \sum_{i=0}^{k-1} p_i. \quad (4)$$

Under the action of this force, the i -th anchor field increases its initial length by the amount of movement of the anchor rod $\delta_i^a = \frac{s_i^a}{E_a F_a}$, where $F_a E_a$, – the cross-sectional area of the anchor bar and the modulus of elasticity of the material, respectively.

The armature winding number i under the action of force p_i moves relative to its body upwards by an amount proportional to the force $f_k^a = c_a p_i$, where the proportionality coefficient c_a depends on the geometric dimensions and shape of the armature turns and is taken constant for all turns.

Deflection k -th turns of threads to downward view as:

$$\Delta_k^a = \delta_0^a - \sum_{i=1}^k \delta_i^a - f_k^a = \delta_0^a - \frac{h_a}{E_a F_a} \sum_{i=1}^k s_i^a - c_a p_k, \quad (5)$$

where Δ_k^a - downward displacement of the k -th anchor loop [m]; δ_0^a – displacement of the first turn in the positive direction of the axis along the anchor body downwards [m].

It should be noted that the directions to the left and right are counted from the FC shell. So to the right of the FC layer is the body of the anchor bar, to the left of it will be located the rock massif.

The output of the anchor number i under the action of the force t_i shift relative to its body upwards by an amount proportional to the force $f_k^{vt} = c_{vt} t_i$, where the proportionality coefficient c_{vt} depends on the geometric dimensions and shape of the armature turns and is assumed to be constant for all turns.

The downward displacement of the k -th right (inner) turn of the sleeve will be expressed by the formula:

$$\Delta_k^{vt} = \Delta_0^{vt} - \sum_{i=1}^k \delta_i^{vt} + f_k^{vt} = \Delta_0^{vt} - \frac{h_{vt}}{E_{vt} F_{vt}} \sum_{i=1}^k \sigma_i^{vt} + c_{vt} p_k, \quad (6)$$

where Δ_k^{vt} - downward displacement of the k th right (inner) turn of the sleeve; Δ_0^{vt} - displacement (downward) of the lower surface of the sleeve; δ_i^{vt} - downward displacement of the i -th inner turn of the sleeve; E_{vt}, F_{vt} - modulus of elasticity of the FC material and

cross-sectional area of the FC respectively, c_{vt} - proportionality coefficient; σ_i^{vt} - force in the i -th sleeve field.

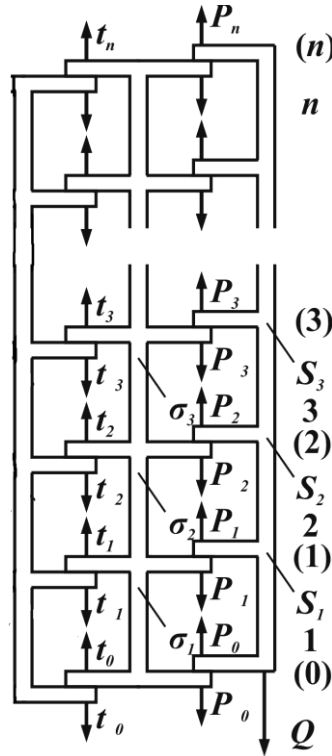


Figure 4 - Load diagram of RMA fixation in a borehole

From simple considerations of static equilibrium, it follows that

$$\sigma_k^{vt} = \sum_{i=0}^{k-1} (p_i^{vt} - t_i) = \sum_{i=0}^{k-1} (p_i - t_i), \quad (7)$$

where p_i^{vt} - forces from the anchor bar acting on the FC bushing; t_i - force on the i -th left (outer) turn of the sleeve.

From (5) and (6), observing that $\Delta_k^a = \Delta_k^{vt}$, we get:

$$\delta_0^a - \Delta_k^{vt} = \frac{h_a}{E_a F_a} \sum_{i=1}^k S_i^a - \frac{h_{vt}}{E_{vt} F_{vt}} \sum_{i=1}^k \sigma_i^{vt} + (c_a + c_{vt}) p_k. \quad (8)$$

After simple but cumbersome transformations, we obtain the expression for t_k and p_k :

$$t_k = \frac{\lambda_1 \lambda_3 Q}{8 \operatorname{sh} \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \operatorname{sh} \frac{\beta_1 - \beta_2}{2}} \left[\frac{e^{-(k+1)\beta_2}}{\operatorname{sh} \frac{\beta_2}{2}} - \frac{e^{-\left(k+\frac{1}{2}\right)\beta_1}}{\operatorname{sh} \frac{\beta_1}{2}} \right] \quad (9)$$

$$p_k = \frac{\lambda_1 Q}{2 \operatorname{sh} \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \operatorname{sh} \frac{\beta_1 - \beta_2}{2}} \left[\operatorname{sh} \frac{\beta_1}{2} e^{-(k+1)\beta_1} - \operatorname{sh} \frac{\beta_2}{2} e^{-(k+\frac{1}{2})\beta_2} \right] + t_k,$$

where

$$\lambda_1 = \frac{h_a}{E_a F_a (c_a + c_{vt})}; \quad \lambda_2 = \frac{h_{vt}}{E_{vt} F_{vt} (c_a + c_{vt})};$$

$$\lambda_3 = \frac{h}{(c_{vt} + c_r)} \left(\frac{1}{E_{vt} F_{vt}} - \frac{1}{E_r F_r} \right);$$

The flow of anchor number i under the action of force t_i will be displaced relative to his body upward by an amount proportional to the force $f_k^r = c_r t_i$, where the proportionality coefficient c_r depends on the geometric dimensions and shape of the turns on the surface of the borehole and is assumed to be constant for all turns.

$E_r F_r$ the elastic modulus of the rock environment and the cross-sectional area of the rock mass interacting with the FC material.

$$\begin{aligned} \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3 &= 4 \operatorname{ch} \beta_1 \operatorname{ch} \beta_2 - 2(\operatorname{ch} \beta_1 + \operatorname{ch} \beta_2); \\ \operatorname{ch} \beta_1 &= 1 + \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{4} + \sqrt{\left(1 + \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{4}\right)^2 - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{4}}; \\ \operatorname{ch} \beta_2 &= 1 + \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{4} - \sqrt{\left(1 + \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{4}\right)^2 - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{4}}, \end{aligned}$$

where h_a, h_{vt} - the leads of thread of the anchor bar and the FC shell, respectively.

The armature winding number i under the action of force p_i will shift relative to its body upwards by an amount proportional to the force $f_k^a = c_a p_i$, where the proportionality coefficient c_a depends on the geometric dimensions and shape of the turns on the surface of the anchor hole and is assumed to be constant for all turns.

In a first approximation, to determine the coefficients c_a, c_{vt} , you can use [22], where the authors proposed the following formula:

$$c_i = \frac{h_i}{E_i F_i},$$

where i – number of the contact surface, starting from the surface of the anchor bar. As the proposed formula shows, only tensile deformations are taken into account. Since the material of the FC is a high-molecular substance, it is advisable to take into account bending, shearing and viscoelastic deformations. According to the calculation scheme of the problem of M.S. Zhukovsky, the FC layer is considered as a rod.

Let us consider a flat bending of a rod. If the length of the rod is co-dimensional with its height, then it is necessary to take into account the influence of shear deformations on its deflection [15]. In technical theory, the shear angle of the cross-section has the form:

$$\gamma = k(z) \frac{Q_y(z)}{GF(z)}$$

$Q_y(z)$ and P - shear force in section z [N]; $F(z)$ - cross-sectional area of the rod [m²]; G – shear modulus of the rod material [Pa]; $k(z)$ – dimensionless coefficient (shear coefficient), which depends on the shape of the cross-section of the rod.

Guided by the averaging of shear energy, approximately the following is taken:

$$k = \frac{F}{I_x^2} \int \frac{S_f^2}{b^2} dF;$$

where $S_f(y) = \int_F y dF$ - static moment about the OX axis of the cut-off part of the cross-section. For a rectangular cross-section of the rod, we have:

$$S_f(y) = \frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{2} - y^2 \right); \quad I_x = \frac{bh^3}{12};$$

$$\tau_y = \frac{6Q_y}{bh^3} \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right); \quad \tau_{\max} = \frac{3Q_y}{2bh} = \frac{3Q_y}{2F}.$$

For a rod of rectangular cross-section, the influence of the change in cross-section along its length on the value of the coefficient is neglected, therefore, we can take $k=6/5$. Since the bending and cross-section of the rod are related, we give the formulas for the additional deflection of the rod axis from the shear angle and from the action of bending forces:

$$\frac{dy_{3c}(z)}{dz} = -k \frac{Q_y(z)}{GF(z)}$$

The minus sign in the formula depends on the choice of direction of the shear force.

For bending, the relationship between deflection is as follows:

$$\frac{d^2 y_M(z)}{dz^2} = \frac{M_x(z)}{EI_x(z)}$$

The differential equation of the elastic line of the rod, taking into account the influence of shear deformation, will have the form:

$$\frac{d^2 y(z)}{dz^2} = \frac{M_x(z)}{EI_x(z)} - k \frac{d}{dz} \left(\frac{Q_y(z)}{GF(z)} \right),$$

where $y(z) = y_m(z) + y_{sh}(z)$ - total deflection of the rod (displacement of the center of gravity of the cross section along the OZ axis. In our case, we will have:

Bending moment and shear force $M(z) = -P(l-z)$; $Q_y(z) = P$.

The boundary conditions for this case will be:

$$y(0) = 0; \quad \frac{dy(0)}{dz} = -k \frac{Q_y(0)}{GF(0)}$$

Then the deflection of the rod axis takes the form:

$$y(z) = -k \frac{Pz}{GF} - \frac{P}{EI_x} \left(\frac{lz^2}{2} - \frac{z^3}{6} \right)$$

The largest deflection is found under the condition $z = l$:

$$y(l) = - \left(k \frac{Pl}{GF} + \frac{Pl^3}{3EI_x} \right) = \frac{Pl^3}{3EI_x} (1 + \lambda)$$

where

$$\lambda = \frac{k(1+\nu)h^2}{2l^2}$$

As shown by the calculations, the deflections are insignificant. Given this and the fact that the FC consists of a high-molecular substance, we will try to take into account the deformations caused by the viscoelastic components of the deformation. So, for the Kelvin-

Voigt model, we have:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2; \sigma = \sigma_1 + \sigma_2$$

Considering that $\sigma_1 = E\varepsilon_1; \sigma_2 = +\eta\varepsilon_2^*$, where E – elasticity modulus; η - dynamic viscosity the equality holds and ε' is the viscoelastic deformation components derivative:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = E\varepsilon + \eta\varepsilon_2^*$$

The equations can be applied both for shear stresses (shear deformation) and for tension-compression. After integrating the equation, we obtain:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-2t}) \quad (10)$$

where t – time; $\lambda = E/\eta$ – the intensity of relaxation, and when $\sigma' = 0$, $\sigma = \sigma_0$ and σ' is the viscoelastic stress components derivative:

For our case we have:

$$\varepsilon(t) = \frac{l_0 - l}{l_0}$$

Thus, considering the fact that $\lambda = E/\eta$, we have an expression for the largest deflection under the conditions $z=l$

$$\delta_i = \frac{l^3 q_0}{3EI_x} (1 + \lambda), \quad (11)$$

where $\lambda = \frac{k(1+\nu)h^2}{2l^2}$ or for a rectangular cross-section of the rod $\lambda=0,78; k=6/5$.

In formula (1) where $\lambda^* = E/\eta$, and $\sigma_0 = q_0 / f_{vt}$, q_0 – axial load on the anchor rod. Then, taking into account these notations, we have:

$$\delta_i^* = \Delta l = \frac{q_0 l_0}{f_{vt} E} (1 - e^{-\lambda^* t}) \quad (12)$$

In the following, λ^* will be understood as $\lambda^* = E/\eta$.

Ultimately, the sum of the displacements of shear bending and viscoelastic deformation takes the form:

$$\delta = \delta_i + \delta_i^* = \left(\frac{l^3}{3EI_x} (1 + \lambda) + \frac{l_0}{f_{vt} E} (1 - e^{-\lambda^* t}) \right) p_0 \quad (13)$$

Considering the fact that in the initial expressions for the displacement of the bushing protrusions, they were searched for in the form

$$\delta_{vt} = c_{vt} p_a,$$

and taking into account (9) we will have

$$c_{vt} = \left(\frac{h_{vt}}{E_{vt} F_{vt}} + \frac{l^3}{3EI_x} (1 + \lambda) + \frac{l_0}{f_{vt} E_{vt}} (1 - e^{-\lambda^* t}) + \frac{l}{E_{vt} F_{vt}} \right) \quad (14)$$

Thus, formula (14) takes into account all components of possible displacements, namely from bending, shear, viscoelastic deformations and compression.

Taking into account the special importance of the FC layer in the mechanism of load transfer from the anchor rod to the rock massif, we will consider as a force parameter the

magnitude of the forces arising in the FC shell. (figures 3 and 4.). The loads on the contact surfaces "AB - FC" - p_k and "FC - rock" - t_k are determined according to formulas (8), (9), and the forces arising in the FC shell, according to formula (7), namely:

$$\sigma_{vt} = \sum_{i=1}^{k-1} (p_i - t_i),$$

where p_i – forces acting on the contact surface of the "AB - FC" system; t_i – forces on the contact surface of the system "FC - hole surface".

The complex parameters characterizing the load in the system "AB - FC - rock" are the values of the average integral values of the quantities p_k ; t_k ; u_k ; σ_{vt} , namely:

$$\begin{aligned} p_a &= \frac{1}{L} \int_0^L p_k(\xi) d\xi \\ t_{vt} &= \frac{1}{L} \int_0^L t_k(\xi) d\xi \\ u_{avt} &= \frac{1}{L} \int_0^L u_{avt}(\xi) d\xi \\ \sigma_{vt} &= \frac{1}{L} \int_0^L \sigma_{vt}(\xi) d\xi. \end{aligned} \quad (15)$$

where L - length of the anchor rod fixation section in the hole ($L = 0.25$ m); p_a – average integral value of forces along the anchor; t_{vt} – average integral value of forces along the borehole surface; u_{avt} – average integral value of anchor rod displacements; σ_{vt} – average integral value of forces in the body of the FC shell.

Let us try to further identify the patterns of influence of the initial parameters and in particular: the magnitude of the preload q , the diameters of the anchor rebar and the borehole d_a , d_{vt} , their elastic moduli E_a , E_{vt} , leads of periodic performances h_a , h_{vt} by the value of their average integral values in the system "AB - FC - rock. To solve the problem, we will use the developed MSA method.

To verify the reliability of the results obtained, we will compare the forces along the anchor rod p_k formula (9) with the results obtained using the finite element method (FEM).

In the FEM model of the anchor fixed in the rock, it is necessary to take into account the possibility of changing the strength of the fastening. For this, it is necessary to introduce special finite elements into the general mesh that simulate the contact between the rod finite elements approximating the anchor and the finite elements of the rock mass. Such contact can be described by a finite element of the usual form (as a finite element approximating the rock mass), but with the deformation and strength properties of the polymer. If we consider that the gap between the anchor rod and the wall of the hole is 3-5 mm, then to approximate the fastener, it is necessary to thicken the mesh of finite elements to reduce their size to the same value. This leads to a significant increase in their number and, accordingly, to an excessive increase in the requirements for computational and time resources for solving the problem. If we do not thicken the mesh, but use finite elements of the same size as for the rock mass, this leads to an artificial increase in the thickness of the polymer fastener, which distorts the

obtained solution results.

To simulate the polymer anchoring of the anchor, we will use a special contact finite element.

When stretching, the stresses in the polymer fastener are related to the deformation by a linear dependence, and are limited by the value of the tensile strength T_p . Then, with a further increase in deformation, the material ruptures, and its tensile strength becomes equal to 0. After that, there is no resistance to stretching in the contact element. When compressed perpendicular to the contact element, the normal stresses are linearly dependent on the compressive strains. After the normal stress reaches the compressive limit value, the modulus of the relationship between normal stresses and strains becomes equal to the modulus of the surrounding rock massif in which the anchor rod is fixed. Thus, the relationship between normal stresses and normal strains is expressed by the relationship:

$$\sigma = \begin{cases} 0, & \text{at } \varepsilon < \varepsilon_p \\ k_\eta \varepsilon, & \text{at } \varepsilon_p < \varepsilon < \varepsilon_c, \\ K_M \varepsilon, & \text{at } \varepsilon_c < \varepsilon \end{cases}$$

where k_η - normal stiffness of the fastener; K_M - rigidity of the rock massif and ε_p – tensile deformation; ε_c – compress deformation.

Figure 5 presents a comparison of the graphical dependences of the contact forces along the anchor rod p_k based on the solution of the generalized problem of M.E. Zhukovsky (9) and the forces obtained using the FEM model. The results were obtained with the following initial data: $L_a = 2.4$ m; $L_{fix} = 0.25$ m; $d_a = 22$ mm; $d_{vt} = 28$ mm; $E_a = 2.1 \cdot 10^{11}$ Pa; $E_{vt} = 0.9 \cdot 10^9$ Pa.

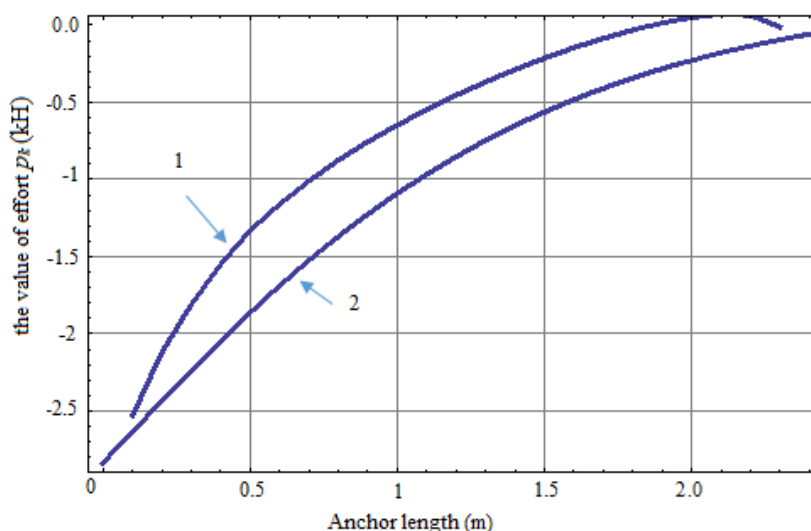


Figure 5 - Graphs of force distribution along the anchor rod: 1- according to the calculation of the FEM method, 2- according to the proposed in (9)

3. Results and discussion. Good correspondence of the force distribution graphs along the anchor rod allows us to be confident that all other dependencies of the force and displacement distributions will also correspond to reality. In the future, it is planned to conduct research in this direction.

After performing the procedures of the above algorithm, the dependence of the functions p_k ; t_k ; u_k ; σ_{vt} from the parameters q , d_a , d_{vt} , E_a , E_v , h_a , h_{vt} take shape:

$$\begin{aligned}
 p_k &= A_p \frac{d_{vt}^{3.73} E_{vt}^{3.7329} h_a^{0.966} h_{vt}^{0.03417} q}{d_a^{3.91} E_a^{0.734894}}; \\
 t_k &= A_t \frac{d_{vt}^{3.5197} E_{vt}^{4.221376} h_a^{0.69105} h_{vt}^{0.307915} q}{d_a^{3.6932} E_a^{0.691915}}; \\
 u_k &= A_u \frac{d_{vt}^{0.00095825} h_a^{2.7050582} q}{d_a^2 E_a^{1.00018} E_{vt}^{0.00102} h_{vt}^{0.002054}}; \\
 \sigma_{vt} &= A_\sigma \frac{d_{vt}^{3.53} E_{vt}^{2.35} h_a^{3.68} q}{d_a^{3.706} E_a^{0.6942} h_{vt}^{1.77}}
 \end{aligned} \tag{18}$$

where $A_p=8.26237 \cdot 10^{-14}$; $A_t=4.47933 \cdot 10^{-36}$; $A_u=41619$; $A_{\sigma vt}=7.98866 \cdot 10^{-79}$.

The obtained formulas (18) allow us to calculate the average integral values of the force distribution in the system “AB – FC – rock”. It should be noted that the movement of the end of the anchor consists of two terms, namely the movement in the locking part l_{lock} of the anchor and the movement of its unfixed section l_{free} :

$$U_0 = A_u \frac{d_{vt}^{0.00095825} h_a^{2.7050582} q}{d_a^2 E_a^{1.00018} E_{vt}^{0.00102} h_{vt}^{0.002054}} + \frac{Pl_{free}}{E_a F_a}$$

4. Conclusions.

1. For the first time, the parameters of the SSS in the system "AB-FC-rock" were obtained in analytical form, which will allow studying the influence of parameters on the strength of anchor rebar fixation in the hole;

2. Analysis of the relative errors of the obtained representation (22) showed that the error of the representation in comparison with the formulas of the obtained solution (16) did not exceed 7%.; comparison of the distribution of forces along the length of the fixed section by the developed and FEM method showed qualitative agreement. The relative error did not exceed 10%, which is acceptable for engineering applications.

LITERATURE / REFERENCES

1. Krykovskiy O. Interaction of rock-bolt supports while weak rock reinforcing by means of injection rock bolts/ Krykovskiy O., Krykovska V., Skipochka S. // Mining of Mineral Deposits, 2021. - 15(4). – p.p. 8-14. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.008>
2. Larionov G I On the One Parameters Influence Evaluating Method Employed to Evaluate the Support Capacity of a Metal-Resin Anchor / Larionov G.I., Larionov N.G. // In Todor Zhelyazov (Ed.) *Modeling of the Soil-Structure* (Nova Science Publishers Inc.: New York), 2020. - Chapter 3. – p.p 87-103.
3. Skipochka S, Krukovskiy O, Serhiienko V and Krasovskiy I 2019 Physical modeling of the rock bolt interaction with the rock massif *E3S web of conferences*, 123, 01002 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301002>.
4. Krukovskiy O, Bulich Yu and Zemlianaia Yu 2019 Modification of the roof bolt support technology in the conditions of increasing coal mining intensity *E3S Web of Conferences* (109), 00042. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900042>

5. Skipochka S. 2019 Conceptual basis of mining intensification by the geomechanical factor *E3S web of conferences*, 109, 00089. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900089>.
6. Ilin S, Adorska L, Samusia V, Kolosov D and Ilina I 2019 Conceptual bases of intensification of mining operations in mines of Ukraine based on monitoring and condition management of mine hoisting systems *E3S web of conferences*, 109, 00030. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900030>
7. Krukovskyi O. Mathematical modeling of unsteady water filtration into anchored mine opening / Krukovskyi O., Krukovska V., Vynohradov Y. // *Mining of Mineral Deposits*, 11(2), 2017. - pp21–27. <https://doi.org/10.15407/mining11.02.021>
8. Mark C New developments with coal mine roof rating / Mark C., Molinda G.M., Barton T.M.// Peng SS. ed. *Proceeding of the 13th International Conf. on Ground Control in Mining* (Morgantown, WV: West Virginia University), 2002.
9. O’Conor D. Measuring the effect of bolt installation practice on bond strength for resin anchored rockbolts / O’Conor D., van Vuuren J., Altounyan P. // *SANIRE 2002 Symposium Redefining the Boundaries*, September
10. Pile J. Shot-encapsulation pull tests for roof bolt evaluation at an operating coal mine / J. Pile, S. Bessinger, C. Marc, S. Taddiini // Peng S.S. ED. *Proceedings of the 22nd International Conference on Ground Control in Mining*. –Morgantown, WV: West Virginia University, 2003. – P. 226-232.
11. Serbousek M.O. Linear load-transfer mechanisms of fully grouted roof bolts / M.O. Serbousek, S.P. Signer// Bureau of Mines. 1987. R19135
12. Mark C. Summary of field measurements of roof bolt performance / C. Mark, D.R. Dolinar, T.P. Mucho // *New Technology for Coal Mine Roof Support*. Pittsburgh, PA. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. Centres for Disease Control and Prevention. National Institute for Occupational Safety and Health, 2000, DHHS,(NIOSH) Publication №2000-151, IC 9453.
13. Whitaker A. Critical assessment of past research into rock bolt anchorage mechanisms / A. Whitaker // Unpublished BE. (Mining Engineering) thesis/ University of New South Wales. – Sydney, 1998.
14. Hagan P.C. Observation on the differences in load transfer of a fully encapsulated rock-bolt / P.C. Hagan // *Proceedings of the Australian Ground Control in Mining Conference*, November, 2003.
15. Peng S.S. *Coal mine ground control*. 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., 1986. P.213–245.
16. Signer S.P. A case study of grouted roof bolt loading in a two-entry gateroad / S.P. Signer, S.D. Jones // Peng SS, ed. *Proceedings of the 12th International Conference on Ground Control in Mining*, WV: West Virginia University, 1990. - P. 35-41.
17. Signer S.P. A case study of grouted roof bolt loading in a two-entry gateroad / S.P. Signer, J.L. Levis // Peng SS. ed. *Proceeding of the 17th International Conference on Ground Control in Mining*. – Morgantown, WV: West Virginia University, 1997. – P. 249-256.
18. Altounyan P.F.R. Instrumentation of procedures for routine monitoring of reinforced mine

- roadways to prevent falls of ground / P.F.R. Altounyan, D.N. Bigby, K.G. Hurt, H.V. Peake // Dhar BB, Bhowmick BC. eds Proceedings of 27th International Conference of Safety in Mines research Institutes. – New Delhi, India, 1997. – Vol.2. – P. 759-766.
19. Larionov G.I. O primeneniі zadachi N.E. Zhukovskogo dlia opredeleniia usilii v zakreplennom metallopolimernom ankere / G.I. Larionov // Geo-Technical Mechanics, 2006. - Vol. 64. - pp 30-40
20. Lure A.I. Operatcionnoe ischislenie i ego prilozheniia k zadacham mekhaniki/ A.I. Lure - M-L.: Gos. izd. tekhn-teor. Lit, 1951. - 432 p.
21. Larionov G.I. Otsiniuvannia konstruktyvnykh parametriv ankernoho kriplennia/ G.I. Larionov // National Metallurgy Academia of Ukraine, 2011. – 286 p.
22. Larionov G.I. 2009 Vykorystannia rozviazku uzahalnenoї zadachi M.Ie. Zhukovskoho dlia vyznachennia napruzhenno-deformovanoho stanu u okoli ankernoho shpuru / G.I. Larionov // Matematychni problemy tekhnichnoi mekhaniky 20-23 kvitnia 2009. - (Dnipropetrovsk-Dniprodzerzhynsk. - p 84-86.
23. Larionov G.I. 2008 Rozrakhunok shchilnosti ankernoho kriplennia z urakhuvanniam poperednoho navantazhennia ta hlybyny roztashuvannia vyrobky / G.I. Larionov // Systemni tekhnologii: Rehional. zb. nauk. Pr. – Dnipropetrovsk, 2008. –Vol. 4(57). - pp 125-138 (ISSN1562.9945).
24. Larionov G.I. Pro vplyv hlybyny rozrobky ta poperednoho navanta-zhennia na shchilnist roztashuvannia ankeriv/ G.I. Larionov// Metody rozviazuvannia prykladnykh zadach mekhaniky deformovanoho tverdoho tila: zb. nauk. pr. – Dnipropetrovsk, 2008. - Vol. 9. - pp 115-128.
25. Krykovskiy O. 2003 Vliianie plotnosti ustanovki vysokonesushchikh ankernykh shtang na formirovanie sistemy opornogo perekrytiia/ O. Krykovskiy // Geo-Technical Mechanics, 2003. - Vol. 47. - pp 254-261.
26. Krykovskiy O. Metody rascheta ankernoi krepі / O. Krykovskiy // Problemy obchysluvalnoi mekhaniky i mitsnosti konstruksii: zb. nauk. pr. - Min-vo osvity i nauky Ukrainy Dnipropetr. nats. un-t (Dnipropetrovsk), 2005. - Vol. 9. - pp 92-99.

Received 10.03.2025.
Accepted 14.03.2025.

Використання методу послідовної апроксимації до визначення повздовжніх зусиль в металополімерному анкері під час проведення тестів на висмикування

Стаття присвячена порівнянню результатів досліджень на висмикування металополімерних анкерів з врахуванням особливостей в системах анкерна штанга-фіксуюча суміш-гірська порода з параметрами отриманими з використанням методу скінчених елементів. Отримані результати демонструють відповідність механізму навантаження металополімерних анкерів. Отримані спрощені формули для визначення залежностей у оболонці фіксуючої суміші від конструктивних параметрів системи. Виконано порівняння отриманих результатів з параметрами отриманими методом скінчених елементів. Представлено графічні залежності. Зроблено висновки про розподіл основних зусиль вздовж металополімерного анкеру. Зроблено висновок про ефективність застосування запропонованого методу до аналізу результатів SEPT тестування.

Ларіонов Григорій Іванович - доктор технічних наук, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна.

Земляна Юлія Валеріївна - головний технолог відділу механіки гірничих порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна.

Хворостян Віктор Олексійович - мол. науковий співробітник відділу механіки гірничих порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна.

Буліч Юрій Юрійович - науковий співробітник відділу механіки гірничих порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна.

Larionov Hryhorii - Doctor of Technical Sciences, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM of the NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine.

Zemliana Yuliia Valerievna - chief technologist in Department of Rock Mechanics Department, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM of the NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine.

Hvorostyan Viktor - Junior Researcher in Department of Rock Mechanics Department, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM of the NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine.

Bulych Yurii - Researcher in Department of Rock Mechanics Department, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM of the NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine.

ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ ДЛЯ ВИПАДКУ ОБМЕЖЕНЬ НА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

Анотація. У статті розглядається узагальнення однієї із задач, що пов'язана з оптимальною організацією виробничого процесу. Це узагальнення стосується розподілу ресурсів для виконання фіксованої множини завдань за наявності спеціальних умов їх використання. Введено поняття множини фіксованих робіт, визначено умови їх узгодженості, розв'язності та балансу завантаження. Досліджено вплив таких обмежень на довжину оптимального упорядкування. Проведено аналіз аномальних випадків, коли зменшення часу виконання завдань, збільшення кількості виконавців або послаблення технологічних обмежень призводить до погіршення розв'язку.

Ключові слова: дискретна оптимізація, комбінаторна оптимізація, теорія розкладів, виробничий процес, граф, розподіл ресурсів, оптимальне упорядкування, аномалії.

Постановка проблеми. Розширення виробництва нерідко пов'язане з необхідністю закупівлі нового обладнання та впровадження нових технологічних процесів. У таких умовах виникають ситуації, коли певні роботи можуть виконуватись лише конкретними виконавцями або, навпаки, нові завдання неможливо реалізувати на старому обладнанні. Це піднімає важливу проблему – як правильно розподілити завдання між виконавцями з урахуванням обмежень, щоб забезпечити ефективне використання ресурсів та мінімізувати час виконання.

Одним із підходів до вирішення цієї проблеми є введення множин фіксованих робіт, які можуть виконуватись лише певними виконавцями. У цій статті розглядаються математичні аспекти цієї проблеми, сформульовані необхідні умови її розв'язності та доведені основні твердження щодо впливу таких обмежень на довжину оптимального упорядкування.

При дослідженні класичних постановок задач теорії розкладів, які відносяться до цього класу, Грехем [1] звернув увагу, що при деякому спрощенні в постановках задач, які б дозволили отримати кращі розв'язки у порівнянні з початковими постановками, отримуємо погіршення. Ці випадки він назвав аномальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У класичних постановках задач упорядкування вважається, що завдання може бути виконано одним виконавцем за заданий час та без переривань. Однак у реальних виробничих процесах нерідко виникають додаткові обмеження, які можуть бути пов'язані з кваліфікацією виконавців, технічними можливостями обладнання, пріоритетністю виконання робіт тощо.

Так, у роботі [2] розглядається важливість паралельного виконання завдань в прискоренні розрахунків електромагнітних феноменів, які включають моделювання 3D-систем з розподіленими параметрами. Це дослідження демонструє, що розподіл обчислювальних ресурсів між кількома задачами дозволяє суттєво зменшити час виконання, що є важливим аспектом і для оптимізації виробничих процесів.

У [3] розглядаються різні алгоритми кластеризації, спрямовані на зменшення енергоспоживання в БСМ. Хоча це дослідження орієнтоване на телекомунікаційні системи, використані в ньому методи оптимізації можуть бути адаптовані до задач розподілу виробничих завдань, особливо у випадках, коли необхідно мінімізувати використання ресурсів.

У статті [4] представлено огляд методів виявлення аномалій у мережевому трафіку. Хоча основна увага приділена кібербезпеці, автори зазначають, що ефективність аналізу залежить від правильного розподілу обчислювальних потужностей між різними системами, що має паралелі із проблемою розподілу завдань у виробничих процесах.

Аналіз відомих результатів показує, що в багатьох прикладних задачах значна увага приділяється додатковим обмеженням, зокрема обмеженій доступності ресурсів, необхідності дотримання технологічних вимог, мінімізації простоїв обладнання та впливу людського фактору на планування виробничих процесів. Одному із узагальнень, а саме фіксації деяких робіт за деякими виконавцями, присвячена дана робота.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є аналіз впливу додаткових умов, пов'язаних з введенням множини фіксованих робіт на оптимальну організацію виробничих процесів. Завданнями дослідження є:

- 1) формулювання умов узгодженості фіксації, розв'язності задачі та балансу завантаження;
- 2) оцінка впливу цих умов на оптимальність розв'язків;
- 3) дослідження можливих аномальних випадків.

Викладення основного матеріалу дослідження. Нехай задано скінчену множину робіт V та кількість виконавців h [5]. Введемо означення множини фіксованих робіт.

Означення. Множина фіксованих робіт $V_r \subseteq V$ визначає ті роботи, які можуть виконуватися лише r -им виконавцем. Це означає, що роботи $i \in V_r$ можуть виконуватися виключно r -им виконавцем, але сам виконавець може виконувати й інші роботи, що не входять до V_r .

Сформулюємо умови можливого уникнення аномалій у задачах із фіксованими роботами.

1. Умова узгодженості фіксації. Для будь-якого виконавця множина його фіксованих робіт повинна бути сумісною з технологічними обмеженнями графа $G(V, U)$. Якщо $i_m \in V$, $i_k \in V_r$, і між ними існує дуга $(i_m, i_k) \in U$, то робота i_m повинна виконуватись або тим самим виконавцем, або іншим виконавцем до початку роботи i_k .

2. Умова розв'язності задачі. Введення множини фіксованих робіт V_r не повинно робити задачу нерозв'язною. Тобто, навіть якщо частина робіт закріплена за конкретними виконавцями, повинне існувати допустиме упорядкування виконання всіх робіт з урахуванням технологічних обмежень і ресурсів.

3. Умова балансу завантаження. Фіксація робіт за виконавцем не повинна призводити до непропорційного завантаження виконавця. Тобто, має виконуватись нерівність:

$$|T_r - \frac{T_{\text{заг}}}{r}| \leq C,$$

де C – задана константа, T_r – загальний час роботи виконавця r , $T_{\text{заг}}$ – загальний час виконання всіх робіт.

Твердження 1. Оптимальне упорядкування робіт при умові заданих додаткових обмежень, що фіксують за виконавцями обов'язкові певні роботи, існує, якщо виконуються умови узгодженості фіксації, розв'язності задачі та балансу завантаження.

Доведення. Припустимо, що для множини фіксованих робіт V_r не існує допустимого упорядкування. Це означає, що хоча б одна з умов узгодженості фіксації, розв'язності або балансу завантаження порушується. Якщо порушується узгодженість, то існує залежність між роботами, яка робить виконання фіксованих робіт неможливим. Якщо не виконується умова розв'язності, то для деякого виконавця всі допустимі упорядкування призводять до неможливості завершення всіх робіт. Якщо ж порушується баланс завантаження, то один із виконавців отримує надмірне навантаження, що робить розподіл нерівномірним. Таким чином, якщо всі три умови виконуються, оптимальне упорядкування існує.

Твердження 2. Зменшення часу виконання робіт або послаблення технологічних обмежень може збільшити довжину оптимального упорядкування.

Доведення. Розглянемо два випадки:

Якщо час виконання певних робіт зменшується, це може призвести до зміни порядку їх виконання, що може викликати затримки інших робіт та вимагати додаткових обмежень.

Якщо послаблюються технологічні обмеження (наприклад, видаляються певні дуги у графі залежностей), це може змінити оптимальний порядок виконання, що у деяких випадках також може збільшити загальну довжину упорядкування [6,7].

Проілюструємо випадки, пов'язані з виникненням аномалій при умові фіксації робіт за виконавцями на наступному прикладі.

Приклад. Нехай задано орієнтований граф G (рис. 1), $h = 3$, список пріоритетів $L = (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10)$, множина ваг вершин (часу виконання завдань) $T = (4,2,2,2,4,1,1,1,1,6)$. Зафіксуємо роботи j_3 та j_{10} за третім виконавцем: $V_r = (3,10)$.

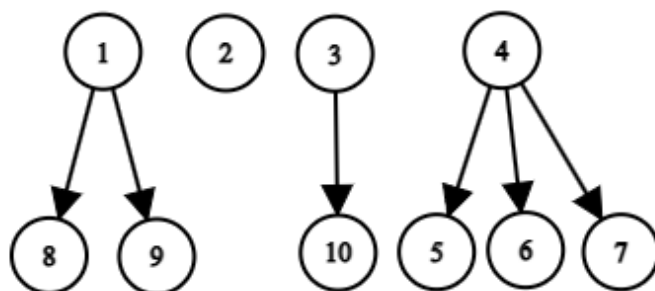


Рисунок 1 – Граф G

Таблиця 1

Оптимальне упорядкування для графа G

1	1	1	1	5	5	5	5
2	2	4	4	6	7	8	9
3	3	10	10	10	10	10	10

Збільшимо кількість виконавців, $h = 4$ та знайдемо оптимальне упорядкування та його довжину для цієї умови.

Таблиця 2

Оптимальне упорядкування для графа G при $h = 4$

1	1	1	1	8				
2	2	5	5	5	5			
3	3	6	10	10	10	10	10	10
4	4	7		9				

Довжина $l = 9$, значення цільової функції збільшується.

Зменшимо час виконання деяких завдань, $T' = (2,2,2,2,4,1,1,1,1,6)$.

Таблиця 3

Оптимальне упорядкування для графа G при T'

1	4	5	5	5	5				
2	2	6	8						
3	3	7	9	10	10	10	10	10	10

Довжина $l = 10$, що на 25% більше за довжину початкового упорядкування.

Послабимо технологічні обмеження та видалимо дуги (j_4, j_5) , (j_3, j_{10}) .

Оптимальне упорядкування для графа G при T'

1	1	1	1	6	8						
2	2	4	4	7	9						
3	3	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10

Довжина $l = 12$, тобто значення довжини збільшилось у цьому випадку на **50%**.

Висновки. Розглянуті математичні моделі доводять, що введення множин фіксованих робіт впливає на структуру оптимального упорядкування. Якщо виконуються всі необхідні умови (узгодженість фіксації, розв'язність задачі та баланс завантаження), то можна знайти допустиме упорядкування. Водночас, навіть зменшення часу виконання або послаблення обмежень не гарантує покращення показників.

Результати цього дослідження підкреслюють необхідність урахування обмежень на виконання фіксованих завдань при плануванні виробничих процесів. Оскільки призначення конкретних робіт певним виконавцям часто є неминучим через технологічні та ресурсні обмеження, ретельне планування та алгоритмічна оптимізація є ключовими для зменшення негативного впливу появи аномалій на результат.

Із зростанням складності виробничих систем здатність оптимізувати планування з урахуванням фіксованих обмежень стає важливим фактором конкурентоспроможності. Вирішення цих завдань вимагає мультидисциплінарного підходу при аналізі математичних моделей для реальних виробничих процесів.

Перспективи подальших досліджень включають розробку нових обчислювальних методів для оптимізації упорядкувань за наявності фіксованих обмежень та дослідження їх практичного застосування у промислових виробничих системах. Аналіз аномальних випадків, пов'язаних із фіксованими множинами завдань, є важливим для розвитку загальної теорії дискретної оптимізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Graham R. Bounds on multiprocessing timing anomalies. *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 1969. Vol. 17. P. 416–429. DOI: 10.1137/0117039.
2. Kolota J., Smykowski J., Stepień S. Graham's anomalies in case of parallel computation electromagnetic phenomena. *Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Computers*. 2007. P. 648-652. DOI: 10.5555/1353956.1354071.
3. Kumar V., Jain S., Tiwari S. Energy Efficient Clustering Algorithms in Wireless Sensor Networks: A Survey. *International Journal of Computer Science Issues*. 2011. Vol. 8(5). P. 259-268. DOI: 10.1109/ICCW.2008.50.
4. Garcia-Teodoro P., Diaz-Verdejo J., Macia-Fernandez G., Vazquez E. Anomaly-based network intrusion detection: Techniques, systems and challenges. *Computers & Security*. 2009. Vol. 28(1-2). P. 18-28. DOI: 10.1016/j.cose.2008.08.003.

5. Турчина В.А., Федоренко Н.К. Алгоритми побудов усіх паралельних упорядкувань заданої довжини. *Питання прикладної математики і математичного моделювання*. 2011. Вип. 11. С. 268-274.
6. Maliienko O.O., Turchyna V.A. The study of the influence of combined changes in the initial data on the occurrence of anomalies for resource allocation. *Питання прикладної математики і математичного моделювання*. 2022. Вип. 22. С. 106-112. DOI: 10.15421/322211.
7. Челпанова О.О., Турчина В.А. Узагальнення аномальних випадків у задачах упорядкування. *Питання прикладної математики і математичного моделювання*. 2021. Вип. 21. С. 220-226. DOI: 10.15421/322122.

REFERENCES

1. Graham R. (1969). Bounds on multiprocessing timing anomalies. *SIAM Journal on Applied Mathematics*. Vol. 17. 416–429. Mode of access: <https://doi.org/10.1137/0117039>.
2. Kolota J., Smykowski J., Stepień S. (2007). Graham's anomalies in case of parallel computation electromagnetic phenomena. *Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Computers*. 648-652. Mode of access: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/1353956.1354071>.
3. Kumar V., Jain S., Tiwari S. (2011). Energy Efficient Clustering Algorithms in Wireless Sensor Networks: A Survey. *International Journal of Computer Science Issues*. 8(5). 259-268. Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ICCW.2008.50>.
4. Garcia-Teodoro P., Diaz-Verdejo J., Macia-Fernandez G., Vazquez E. (2009). Anomaly-based network intrusion detection: Techniques, systems and challenges. *Computers & Security*. 28(1-2). 18-28. Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2008.08.003>.
5. Turchyna V.A., Fedorenko N.K. (2011). Algorithms for constructing all parallel orderings of a given length. *Problems of applied mathematics and mathematical modeling*. 11. 268-274. Mode of access: <https://pm-mm.dp.ua/index.php/pmmm/article/view/59>.
6. Maliienko O.O., Turchyna V.A. (2022). The study of the influence of combined changes in the initial data on the occurrence of anomalies for resource allocation. *Problems of applied mathematics and mathematical modeling*. 22. 106-112. Mode of access: <https://doi.org/10.15421/322211>.
7. Chelpanova O.O., Turchyna V.A. (2021). Generalization of anomalous cases in ordering problems. *Problems of applied mathematics and mathematical modeling*. 21. 220-226. Mode of access: <https://doi.org/10.15421/322122>.

Received 11.03.2025.
Accepted 13.03.2025.

Optimal resource allocation task under usage constraints

This paper investigates the problem of optimal resource allocation in production processes, focusing on the impact of fixed-task assignments under limited technological and resource constraints. The study generalizes an optimization problem related to the efficient organization of production workflows by introducing a formal framework for distributing resources across a fixed set of tasks while adhering to specific operational restrictions.

To ensure feasible scheduling within such constraints, three fundamental conditions are introduced. The consistency condition ensures that task dependencies remain intact and comply with predefined technological constraints. The solvability condition guarantees that a viable execution sequence exists, even when specific tasks are fixed within the workflow. The workload balance condition prevents uneven distribution of tasks among performers, optimizing the overall efficiency of the production process. These conditions are mathematically formalized, and their role in enabling an optimal task sequence is analyzed.

The research also explores the effects of these constraints on the length of an optimal task sequence. It is shown that the introduction of fixed-task sets and the enforcement of balance conditions can significantly alter scheduling outcomes, sometimes leading to counterintuitive results. In particular, a detailed investigation of anomalous cases reveals that reducing task execution time or relaxing technological restrictions does not always lead to better scheduling efficiency. On the contrary, such modifications may increase the overall ordering length due to disruptions in dependency structures and inefficiencies in task redistribution.

The findings contribute to a deeper understanding of how task dependencies and operational constraints interact in scheduling problems, offering valuable insights for optimizing production planning under certain restrictions. This study provides both theoretical foundations and practical implications for improving workflow efficiency in industrial settings where resource limitations and rigid task structures play a crucial role.

Keywords: discrete optimization, combinatorial optimization, scheduling theory, production process, graph, resource allocation, optimal ordering, anomalies.

Малієнко Ольга Олександрівна – аспірант Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Турчина Валентина Андріївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Maliienko Olha – Postgraduate Student of Oles Honchar Dnipro National University.

Turchyna Valentyna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Cybernetics of Oles Honchar Dnipro National University.

**МЕТОДИ, АЛГОРИТМИ ТА ПРОГРАМИ
ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПОМИЛОК В ГЕОПРОСТОРОВІЙ БАЗІ ДАНИХ
НА ПРИКЛАДІ ДЕРЖАВНОГО ЗЕМЕЛЬНОГО КАДАСТРУ**

Анотація. Ведення великих геопросторових баз даних супроводжується значними ризиками внесення помилок, що можуть негативно впливати на точність даних та подальші процеси їх використання. Основними причинами помилок є людський фактор, технічні неточності при поєднанні даних та розбіжності у проєкціях зберігання. В умовах постійного зростання обсягу даних, ручні перевірки стають малоефективними, що зумовлює необхідність розробки методів автоматизованого пошуку помилок.

*Метою статті є розробка та перевірка алгоритмів для виявлення помилок у на прикладі бази земельних ділянок Державного земельного кадастру України. Результати дослідження показали ефективність застосування просторових запитів, таких як *point-in-polygon* та *polygon-in-polygon*, для виявлення некоректного розташування об'єктів. Запропоновані алгоритми дозволяють зменшити кількість помилок шляхом автоматичного контролю правильності внесення інформації. Застосування автоматизованих механізмів перевірки сприятиме підвищенню якості кадастрових даних, що є важливим для сфери містобудування та управління земельними ресурсами.*

Ключові слова: геопросторові бази даних, аномалії, Державний земельний кадастр, автоматизована перевірка, просторовий аналіз, алгоритми пошуку помилок.

Постановка проблеми. Підтримка великих геопросторових баз даних супроводжується значними ризиками внесення помилок, які можуть негативно впливати на якість даних і, відповідно, на подальші процеси роботи з ними. Основні джерела таких помилок включають людський фактор під час введення або обробки даних, технічні неточності при інтеграції даних з різних джерел (зокрема через розбіжності у системах координат та форматах зберігання). Впровадження автоматизованих механізмів перевірки дозволяє підвищити продуктивність обробки даних та мінімізувати ймовірність помилок, особливо тих, що повторюються і піддаються алгоритмічній перевірці.

Зі збільшенням обсягу інформації ручні методи верифікації стають неефективними через високі часові витрати, що зумовлює необхідність впровадження автоматичного пошуку та класифікації помилок. Для вирішення цієї наукової проблеми необхідно виконати ряд завдань:

- Провести аналіз поширених видів помилок.
- Створити методи та алгоритми для пошуку цих помилок.

- Розробити програму для перевірки геопросторових даних.
- Провести тестування розробленого програмного забезпечення на реальних даних.

Оскільки геопросторові дані можуть мати критичну роль у процесах управління земельними ресурсами, містобудування, екологічного моніторингу та інших сферах, розробка алгоритмів та програм для підтримки достатнього рівня їхньої точності є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень. Проблема пошуку помилок в геоінформаційних системах у загальному вигляді досліджувалась різними науковцями. У своїх дослідженнях автори підтверджували актуальність проблеми та поділяли помилки у геопросторових базах даних на кілька високорівневих категорій[1][2]:

- *Помилки позиціонування.* Виникають через неточності у визначенні розташування об'єктів на карті.
- *Топологічні помилки.* До цього типу помилок належать геометричні порушення, зокрема перетини, розриви або відсутність зв'язків між елементами.
- *Атрибутивні помилки.* Цей тип похибок виникає при неправильному присвоєнні характеристик геооб'єктам. Наприклад, землі сільськогосподарського призначення можуть бути помилково віднесені до боліт.

На жаль, досліджувані джерела не деталізують помилки та не пропонують конкретні методи і алгоритми їх пошуку.

Мета статті. Метою статті є опис методів пошуку окремих видів помилок геопросторових баз даних, розробка алгоритмів та перевірка їх ефективності на прикладі бази даних земельних ділянок Земельного кадастру України.

Основний матеріал. У своїй роботі доктор Dr. Chrisman[1] описує один із можливих підходів до перевірки валідності просторових даних на прикладі програми, в яку вноситься розташування річкових буїв. Він наголошує, що об'єкти, які за своєю природою повинні розташовуватися на водній поверхні, повинні мати координати, що потрапляють у визначені межі (рис. 1), в іншому випадку це може свідчити про помилки у даних.



Рисунок 1 - Схематичне зображення річкового буя та визначеної акваторії

Для автоматизованої верифікації цієї умови може бути використаний просторовий запит point-in-polygon, який дозволяє перевірити, чи знаходяться точкові об'єкти (у даному випадку – буї) у межах полігональних об'єктів (межах водних територій). Такий підхід є простим, але ефективним інструментом контролю якості даних і може бути застосований не лише для навігаційних об'єктів, але й у ширшому спектрі завдань,

пов'язаних із перевіркою коректності розташування об'єктів у геопросторових базах даних.

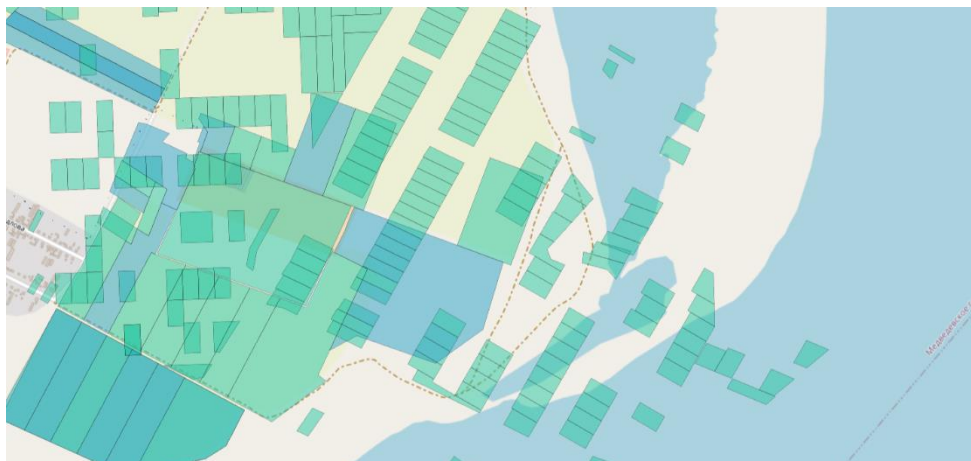


Рисунок 2 - Приклад помилково зареєстрованих земельних ділянок на узбережжі Криму

Цей підхід можна адаптувати для перевірки коректності інформації про земельні ділянки, зокрема щодо їхнього розташування у заборонених зонах або зонах з обмеженням використання.

Перевірка входження ділянки до дозволеної зони.

Прямою аналогією до річкових буїв та акваторій є перевірка того, чи знаходиться земельна ділянка або її частина у межах прибережної захисної смуги або водного об'єкта. Такий вид помилок можна знайти вручну в Державному земельному кадастрі (рис. 2), а отже ця проблема потребує механізмів для її автоматичного розпізнавання.

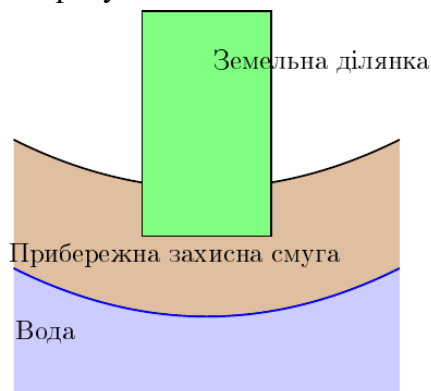


Рисунок 3 - Схематичне зображення земельної ділянки що перетинає прибережну захисну смугу

Необхідність такого виду перевірки визначається положеннями законів України, зокрема Водного кодексу України, які встановлюють особливі обмеження у користуванні та власності таких об'єктів. Стаття 6 Водного кодексу встановлює, що води (водні об'єкти) є виключно власністю Українського народу і надаються тільки у користування [3]. При цьому водним об'єктом вважається будь-який природний або створений

штучно елемент довкілля, в якому зосереджуються води. Це може бути море, лиман, річка, струмок, озеро, водосховище, ставок, канал, тощо.

Окрім обмежень безпосередньо на території водних об'єктів, Водний кодекс також визначає поняття прибережної захисної смуги[3] як частини водоохоронної зони відповідної ширини вздовж водойм, на якій встановлено більш суворий режим господарської діяльності, ніж на решті території. Такі зони встановлюються з метою охорони поверхневих водних ресурсів від забруднення та засмічення, а також для збереження їхньої водності. Відповідно до законодавчих норм, у межах таких смуг можуть діяти певні обмеження на використання земель, включаючи заборону на будівництво, ведення сільськогосподарської діяльності або зміну ландшафту.

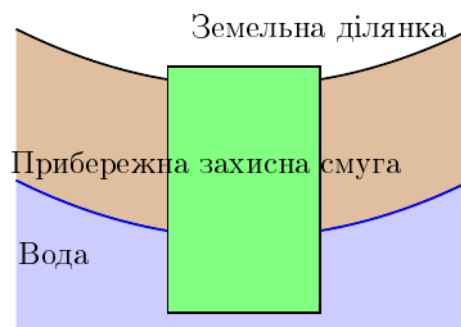


Рисунок 4 - Схематичне зображення земельної ділянки що перетинає водну поверхню

Обмеження господарської діяльності, встановлені Водним кодексом, мають бути внесені у базу даних земельного кадастру при реєстрації ділянки, тобто є окремим об'єктом відомостей кадастру[4], що є потенційним місцем виникнення помилок через людський фактор.

Для автоматизованої перевірки відповідності розташування земельних ділянок цим нормативним вимогам може бути використаний просторовий аналіз із запитом *polygon-in-polygon* або *intersects*, який дозволяє визначити, чи перетинається контур ділянки з межами водної поверхні (рис. 4). Такий підхід дозволяє виявити потенційні проблеми ще на етапі реєстрації ділянки або під час моніторингу змін у кадастрових даних.

Оскільки у прибережних смугах встановлюються обмеження у використанні земельних ділянок[5], доцільно також автоматично перевірити потрапляння земельної до меж прибережної смуги (див. рис. 3), що унеможливить відсутність внесених у базу даних обмежень для конкретної ділянки.

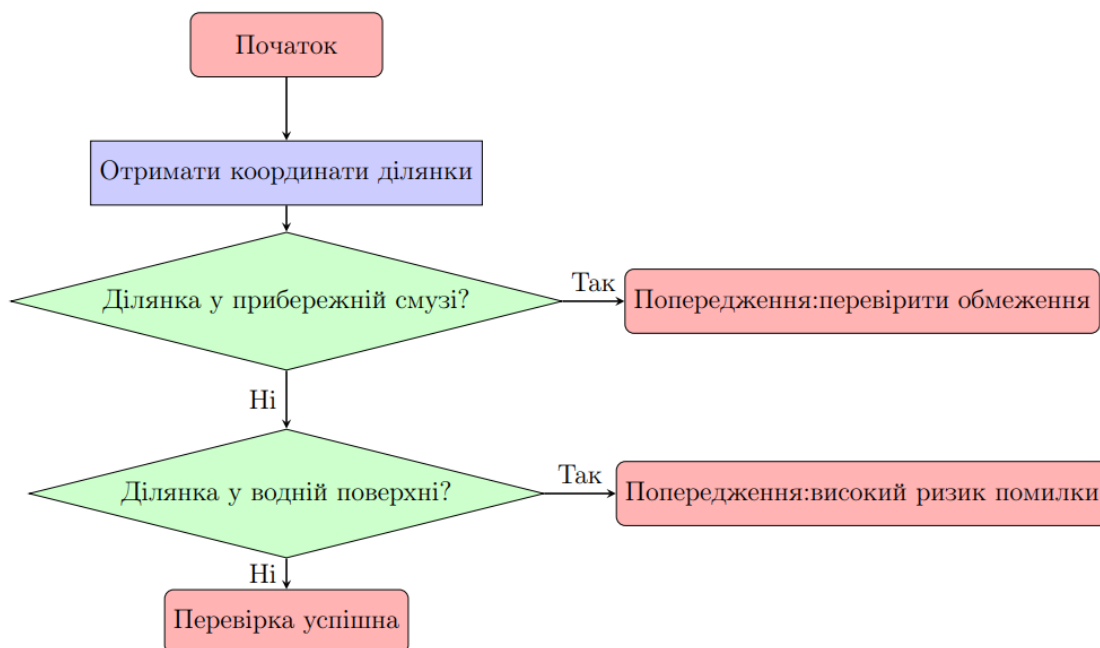


Рисунок 5 - Блок-схема перевірки входження ділянки у прибережну смугу та водну поверхню

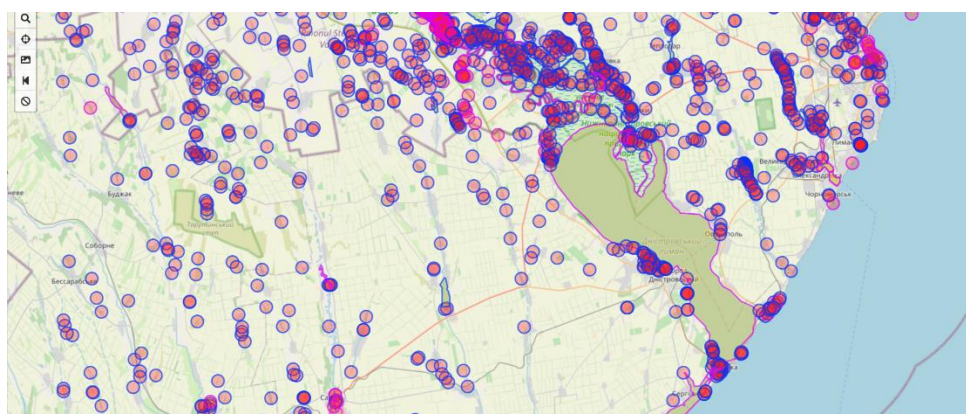


Рисунок 6 - Результати пошуку геометрії водних об'єктів в OpenStreetMap з допомогою overpass turbo

За наявною інформацією складемо алгоритм перевірки місцезположення ділянок:

1. Початок
2. Отримати координати земельної ділянки
3. Перевірити належність земельної ділянки до прибережної захисної смуги:
 - а. Якщо ділянка входить у прибережну захисну смугу → Вивести попередження "Перевірити обмеження"
 - б. Інакше → Перейти до кроку 4
4. Перевірити, чи ділянка розташована на водній поверхні:
 - а. Якщо ділянка потрапляє у межі водної поверхні → Вивести попередження "Високий ризик помилки"

в. Інакше → Перейти до кроку 5

5. Кінець

Схематично алгоритм представлений на рисунку №5.

Для практичної перевірки алгоритму з відкритого джерела OpenStreetMap завантажено масив полігонів, які позначають межі водних об'єктів в межах Одеського району Одеської області, а з Державного земельного кадастру - масив геометрій земельних ділянок. Завантаження меж водних об'єктів здійснено інструментом overpass turbo, який дозволяє робити запити за допомогою інструменту формування запитів (рис. 6). Для завантаження меж земельних ділянок використано ресурс kadastr.live.

В результаті отримано два набори даних - 2268 меж водних об'єктів та 417573 межі земельних ділянок. Створено програму для вибірки з наборів даних тих об'єктів, які підпадають під умову розробленого алгоритму. В результаті виконання програми знайдено 1378 записів в земельному кадастрі, які перетинають водну поверхню (рис. 7).

Результати:				
cadnum	geometry
0	5110800000:03:001:0478	...	MULTIPOLYGON	
1	5110800000:03:001:0478	...	MULTIPOLYGON	
2	5120484200:01:002:1057	...	POLYGON	
3	5121010100:01:001:0130	...	MULTIPOLYGON	
4	5121084100:01:001:1460	...	POLYGON	
...	
1373	5121085600:01:001:0586	...	POLYGON	
1374	5110300000:02:004:0266	...	POLYGON	
1375	5110300000:02:015:0006	...	POLYGON	
1376	5110300000:01:001:0657	...	POLYGON	
1377	5110300000:02:001:0427	...	POLYGON	

[1378 rows x 88 columns]

Рисунок 7 - Перелік ділянок з перетином водної поверхні

Ручна перевірка результатів показує, що більшість результатів - лише попередження про входження ділянки у захисну зону, проте є і приклади ділянок, які розташовані, наприклад, посеред Хаджибейського лиману (рис. 8). Впровадження автоматизованих методів перевірки на ранніх етапах внесення даних може допомогти в подальшому уникнути такої проблеми.

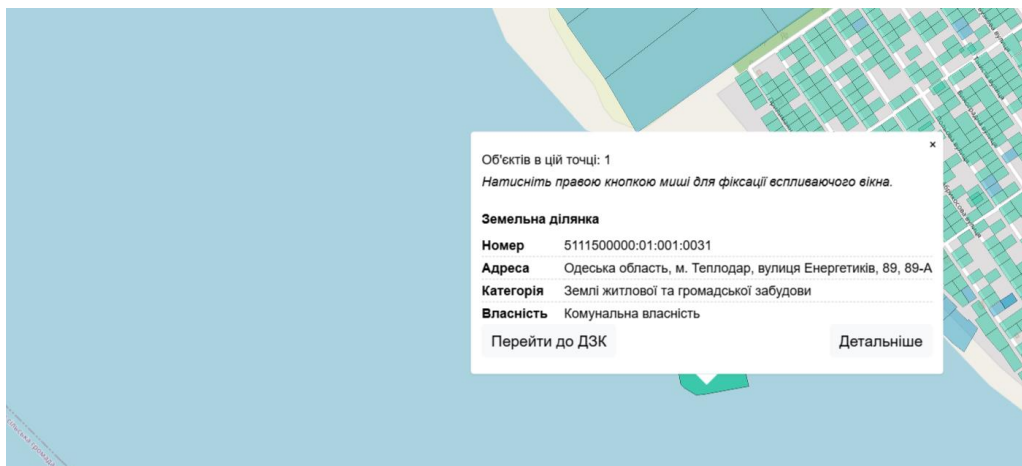


Рисунок 8 - Приклад ділянки зареєстрованої посеред Хаджибейського лиману

Перевірка відповідності атрибутивної інформації до зонування

Не завжди заборонені зони відносяться до усіх об'єктів одного класу. Наприклад, у об'єктах Природно-Заповідного фонду можуть створюватись земельні ділянки, власне, заповідного фонду, або на території озер - ділянки для ведення рибного господарства. Важливо враховувати контекст атрибутивних значень при перевірці. Контекст може враховуватись як алгоритмічно, так і з використанням методів обробки природної мови[6].

НКЗ : НКК : НЗД

Рисунок 9 - Формат кадастрового номера

Розглянемо детальніше це твердження на прикладі кадастрового номеру. Формат кадастрового номера має чітку структуру (рис. 9), що складається з трьох компонентів[7]:

1. 12 цифр НКЗ — номер кадастрової зони, в якому останні дві цифри відокремлюються від перших десяти двокрапкою;
2. 3 цифри НКК — номер кадастрового кварталу в межах кадастрової зони;
3. 4 цифри НЗД — порядковий номер земельної ділянки в межах кадастрового кварталу

Розбиття кадастрового номера на складові проілюстровано на рис. №10.

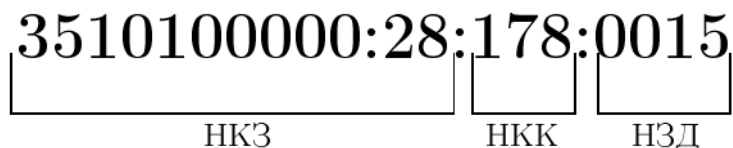


Рисунок 10 - Розбиття кадастрового номера на складові частини

Інформація про межі зон та кварталів зберігається в індексній кадастровій карті і містить дані про геометрію кожної зони та кварталу, це дозволяє провести логічну перевірку: усі земельні ділянки повинні просторово належати відповідним кадастровим зонам і кварталам, зазначеним у їх номерах. Схематично це проілюстровано на малюнку №11.



Рисунок 11 - Кадастрова зона та земельна ділянка в третьому кварталі

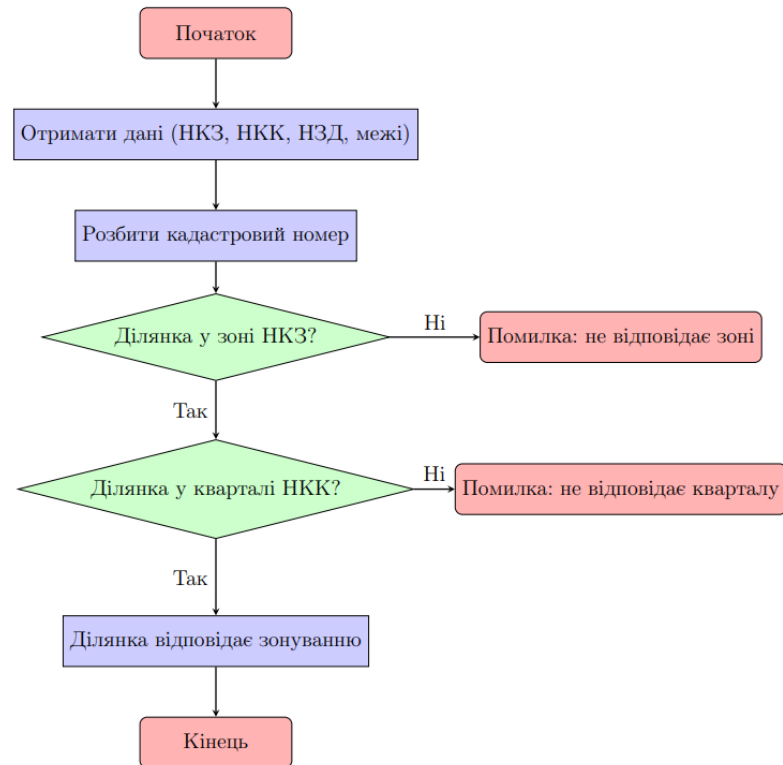


Рисунок 12 - Блок-схема перевірки відповідності земельної ділянки індексній карті

За наявною інформацією побудуємо алгоритм перевірки відповідності ділянки кадастровій зоні та кварталу:

1. Початок
2. Отримати дані:
 - a. Кадастровий номер земельної ділянки (НКЗ, НКК, НЗД)
 - b. Геометричні межі ділянки
 - c. Геометричні межі кадастрових зон і кварталів
3. Розбити кадастровий номер на складові:
 - a. Виділити НКЗ (номер кадастрової зони)
 - b. Виділити НКК (номер кадастрового кварталу)
 - c. Виділити НЗД (номер земельної ділянки)
4. Перевірити належність земельної ділянки до відповідної кадастрової зони:
 - a. Якщо межі ділянки входять у межі зони НКЗ → Перейти до кроку 5
 - b. Інакше → Вивести помилку "Ділянка не відповідає кадастровій зоні"
5. Перевірити належність земельної ділянки до відповідного кадастрового кварталу:
 - a. Якщо межі ділянки входять у межі кварталу НКК → Перейти до кроку 6
 - b. Інакше → Вивести помилку "Ділянка не відповідає кадастровому кварталу"
6. Результат перевірки:

- а. Якщо всі перевірки пройдені успішно → Вивести "Ділянка відповідає зонуванню"

7. Кінець

У вигляді блок-схеми описаний алгоритм показано на рис. 12.

Для перевірки роботи алгоритму було завантажено масив земельних ділянок у межах м. Києва, що налічує 53 849 об'єктів. На основі розробленого алгоритму створено програму, яка здійснює перевірку відповідності зазначеної у кадастровому номері зони та кварталу фактичному місцю розташування ділянки. Як вихідні дані використовувалися офіційні відомості про земельні ділянки та індексна кадастрова карта, опубліковані Державною службою геодезії, картографії та кадастру у 2020–2023 рр.

Для обробки геопросторових даних та реалізації алгоритму використано мову програмування Python із залученням бібліотеки GeoPandas. Поєднання векторних даних із кадастрової карти та їх перевірка здійснювалися шляхом пошуку перетинів, що дозволило автоматично виявляти невідповідності між записами кадастру та реальним місцем розташування земельних ділянок.

```
Результати:  
> python check_data.py  
Warning: cadnum 8000000000:75:741:0028 does not match zona and kvart  
Warning: cadnum 8000000000:72:184:0054 does not match zona and kvart  
Warning: cadnum 8000000000:75:741:0130 does not match zona and kvart  
Warning: cadnum 8000000000:82:011:0020 does not match zona and kvart  
Warning: cadnum 8000000000:72:252:0236 does not match zona and kvart  
Warning: cadnum 8000000000:85:311:0029 does not match zona and kvart  
Warning: cadnum 8000000000:79:117:0003 does not match zona and kvart
```

Рисунок 13 - Результати перевірки кадастрових номерів м. Києва

Результати виконання програми наведені на рис. 13 та показують, що у 7 ділянках неправильно зазначені кадастрові зони або квартали, що може свідчити про помилку на етапі формування кадастрової ділянки або внесення змін до неї.

Додаткові матеріали. З вихідними кодами розроблених програм можна ознайомитись за посиланням: <https://github.com/oshyshatskyi-phd/parcels-check-programs/>

Висновки. Описані в статті методи та алгоритми дозволяють здійснювати комплексну перевірку як просторових, так і атрибутивних даних. Наведені приклади перевірки належності об'єктів до визначених географічних зон:

- земельних ділянок, що входять до прибережних захисних смуг
- відповідності кадастрових номерів фактичному розташуванню

Результати виконання розроблених програм демонструють ефективність підходу. Використання просторових запитів типу *point-in-polygon* та *polygon-in-polygon* дозволяє швидко ідентифікувати потенційні помилки на ранніх етапах обробки даних. Практична перевірка алгоритмів на реальних даних підтвердила ефективність у виявленні невідповідностей.

Отже, застосування розроблених методів може підвищити загальну точність та надійність інформації, яка є основою для прийняття важливих управлінських рішень у сфері містобудування, земельного кадастру та екологічного моніторингу. Подальші

дослідження можуть бути спрямовані на розширення функціоналу алгоритмів з метою виявлення більш специфічних помилок, пошук універсальних методів аналізу простої інформації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Chrisman, N. R. The error component in spatial data / N. R. Chrisman // *Geographical information systems*. – 1991. – № 1.12. – С. 165–174.
2. Pascual, M. S. GIS Data: A Look at Accuracy, Precision, and Types of Errors [Електронний ресурс] / M. S. Pascual. – URL: <https://www.geographyrealm.com/gis-data-a-look-at-accuracy-precision-and-types-of-errors/>.
3. Верховна Рада України. Водний кодекс України [Електронний ресурс]. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>.
4. Верховна Рада України. Закон України «Про Державний земельний кадастр» [Електронний ресурс]. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17#Text>.
5. Верховна Рада України. Земельний кодекс України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>.
6. Євланов М. В., Мороз Б. І., Мороз Д. М., Лучицький В. В. Інформаційна технологія виявлення термінів та артефактів проєкту у вимогах до інформаційної системи // АСУ та прилади автоматики. – 2024. – № 1(182). – С. 73–93. – DOI: <https://doi.org/10.30837/0135-1710.2024.182.073>
7. Верховна Рада України. Структура номера земельної ділянки [Електронний ресурс]. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-%D0%BF#n244>.

REFERENCES

1. Chrisman, N. R. (1991). The error component in spatial data. *Geographical Information Systems*, 1(12), 165–174.
2. Pascual, M. S. (n.d.). GIS data: A look at accuracy, precision, and types of errors. Retrieved from <https://www.geographyrealm.com/gis-data-a-look-at-accuracy-precision-and-types-of-errors/>
3. Verkhovna Rada Ukrainy. (1995). *Water Code of Ukraine* (No. 213/95-VR). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>
4. Verkhovna Rada Ukrainy. (2011). *Law on the State Land Cadastre* (No. 3613-17). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17#Text>
5. Verkhovna Rada Ukrainy. (2001). *Land Code of Ukraine* (No. 2768-14). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>
6. Yevlanov, M. V., Moroz, B. I., Moroz, D. M., & Luchytskyi, V. V. (2024). Information technology for detecting project terms and artifacts in information system requirements. *ASU and Automation Devices*, 1(182), 73–93. <https://doi.org/10.30837/0135-1710.2024.182.073>.
7. Verkhovna Rada Ukrainy. (2012). *Structure of the cadastral number of a land plot* (Resolution No. 1051-2012-P). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-%D0%BF#n244>

Received 12.03.2025.
Accepted 14.03.2025.

***Methods, algorithms, and programs for error detection
in a geospatial database: a case study of the state land cadastre***

Maintaining large geospatial databases involves significant risks of errors, which can negatively impact data accuracy and subsequent usage processes. The primary causes of errors include human factors, technical inaccuracies in data integration, and discrepancies in storage projections. With the continuous growth of data volume, manual verification methods become inefficient, necessitating the development of automated error detection methods.

The aim of this study is to develop and validate algorithms for error detection using the land parcel database of the State Land Cadastre of Ukraine as a case study. The research results demonstrate the effectiveness of spatial queries, such as point-in-polygon and polygon-in-polygon, in detecting incorrect object placement. The proposed algorithms help reduce the number of errors by automatically controlling the accuracy of data entry. Implementing automated verification mechanisms will enhance the quality of cadastral data, which is crucial for urban planning and land resource management.

Keywords: geospatial databases, anomalies, State Land Cadastre, automated verification, spatial analysis, error detection algorithms.

Мороз Борис Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Шишацький Олександр Олександрович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Moroz Borys – Doctor of Technical Sciences, Professor at the PZKS, National Technical University "Dnipro Polytechnic".

Shyshatskyi Oleksandr – PhD student at the PZKS, National Technical University "Dnipro Polytechnic".

ЗАВДАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАТЕРІАЛОПОДАЧІ ДЛЯ ІННОВАЦІЙНОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО ПРИНТЕРА ТИПУ FUGO

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності та ефективності роботи інноваційного циліндричного 3D принтера моделі Fugo, де ключовим є контроль подачі матеріалу в обертовий драм. Постановка проблеми полягає у розробці алгоритму розрахунку об'єму матеріалу, який необхідно подавати для формування кожного шару моделі з урахуванням геометричних особливостей драма. Метою роботи є створення математичної моделі для точного визначення об'єму матеріалу, що дозволить забезпечити рівномірну товщину шарів під час друку. Використано методи чисельного інтегрування (метод трапецій) для розрахунку об'ємів тіл обертання, що описують форму драма. Результати дослідження підтверджують ефективність запропонованого алгоритму, що дозволяє точно контролювати подачу матеріалу та забезпечує високу якість друку.

Ключові слова: циліндричний 3D принтер, подача матеріалу, математична модель, тіла обертання, чисельне інтегрування, метод трапецій, інженерне креслення, висота шару.

Постановка проблеми. Адитивні технології або технології пошарового синтезу, 3D-друк - сьогодні один із найбільш динамічних напрямів “цифрового” виробництва. Такі технології дозволяють значно прискорити вирішення задач підготовки виробництва та виготовлення продукції. 3D-друк здатний здійснити революцію в багатьох сферах життя. За динамікою розвитку ринок адитивних технологій випереджає інші галузі виробництва.

Однією з важливих задач, яка виникає при побудові програмного забезпечення для інноваційного циліндричного 3D принтера Fugo [1], є своєчасна подача матеріалу [2] в циліндричний драм, який обертається з приблизною швидкістю в 25 обертів в секунду [2]. Процес подачі матеріалу повністю контролює товщину кожного шару, який буде надрукований рухомою голівкою з лазерними установками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Якщо говорити про застосування 3D друку, варто враховувати не тільки існуючі можливості, а й перспективи. Уже сьогодні застосування технології 3D друку надзвичайно широко і не припиняє розширюватися. Безумовно, в майбутньому нас очікує масштабне поширення адитивних методик, але практичне застосування 3D друку доступно кожному вже сьогодні.

Аналіз можливостей та перспектив застосування 3D-друку в різних галузях пропонується в низці статей "Застосування 3D друку: на що здатен 3D друк" компанії «pro3d.com.ua». Автори розглядають практичні аспекти впровадження технології 3D-друку, включаючи прототипування, дрібносерійне виробництво, ремонт та відновлення деталей, а також виготовлення побутових предметів та іграшок.

Андрощук Г. О. в своїй роботі [3] аналізує економічні та правові аспекти впровадження адитивних технологій, зокрема 3D-друку. Автор розглядає потенційні проблеми, пов'язані з порушенням прав інтелектуальної власності при персональному 3D-друку, та надає статистичні дані щодо можливих економічних наслідків у цій сфері.

Ці джерела допоможуть глибше зрозуміти та вирішити різноманітні проблеми, що виникають при використанні технологій 3D-друку.

Мета дослідження. При запіканні кожного наступного шару моделей спеціальний поршневий насос подає заздалегідь визначений об'єм матеріалу (в мм^3) в циліндричний драм, збільшуючи рівень матеріалу над попереднім запеченим $i - 1$ шаром на висоту h_i для формування наступного i -го шару (рис. 1)

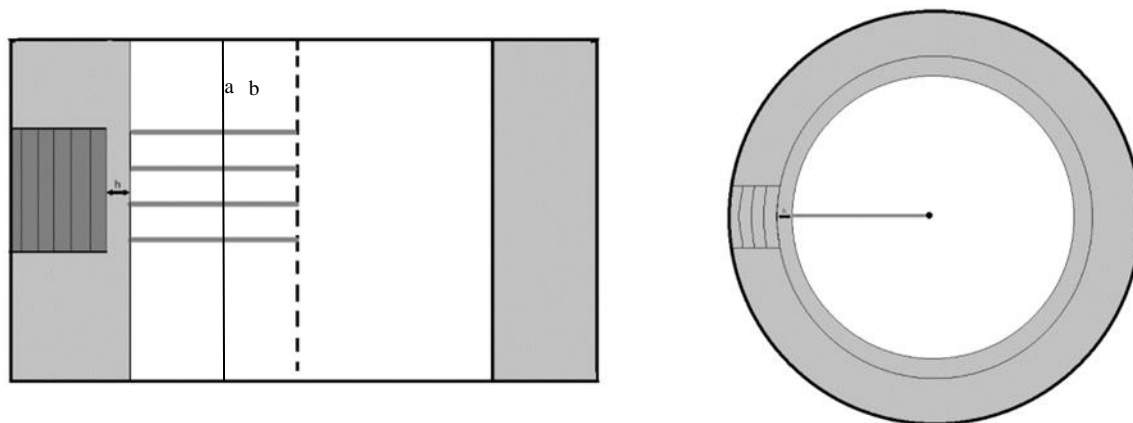


Рисунок 1 - Ілюстрація в розрізі подачі матеріалу в циліндричний драм, який обертається, збільшуючи рівень матеріалу на висоту наступного шару h для його подальшого запікання

Для загальності не будемо обмежувати друк принтера сталою висотою (товщиною) шарів. Тобто від користувача надана така послідовність товщин для всіх шарів $L_i, i \in [0, n] h_i \in [h_1, h_2]$, де h_1, h_2 задані константи, залежні від матеріалу.

Задача програмного забезпечення – надати принтеру послідовність чисел v_i , які належать «джоб» файлу [1] для друку, де v_i – об'єм матеріалу, який необхідно додати в драм за допомогою насоса для кожного шару, вважаючи, що компоненти насоса здатні додавати матеріал заданого об'єму в задовільній точності.

Викладення основного матеріалу дослідження. Далі для наступних роздумів будемо вважати, що циліндричний драм виконаний по принципу ідеального циліндра, тобто кришка та дно драма є ідеально рівні поверхні перпендикулярні до осі обертання.

В реальності прототип принтера не є таким, що робить задачу більш складною, але принцип залишається таким самим.

Для розрахунку об'єму матеріалу, який необхідно додати в ідеальний циліндр, треба знати об'єм циліндра звуженого до лінії рівня **a** матеріалу (рис. 1) та відняти від нього об'єм циліндра звуженого до бажаної лінії матеріалу **b**. Така різниця і буде шуканим об'ємом, що треба додати до циліндру, щоб отримати рівень матеріалу заповнений до **b** (рис. 1). Так як кожному шару L_i відповідає радіус зрізу (слайсу) R_i на якому він зроблений, можна з легкістю обчислити таку різницю об'ємів, знаючи формулу об'єму циліндра:

$$V_i = \pi h (R_{i-1}^2 - R_i^2) \quad (1)$$

Якщо поглянути на інженерне креслення прототипу драма в розрізі, біля дна можна побачити декілька кривих і прямих ліній, що роблять обчислення об'єму звужених до ліній рівня більш складними. Для такої задачі були використані формули для обчислення об'ємів тіл обертання, які були пристосовані до кусково-неперервних функцій, що представляли профіль драма.

Розглянемо креслення принтера, передані від команди інженерів (рис. 2):

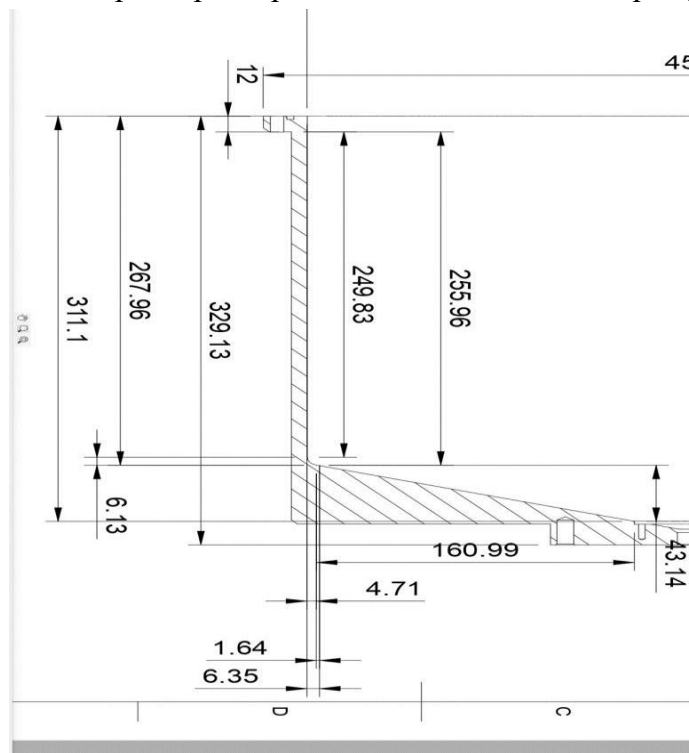


Рисунок 2 - Інженерне креслення драма

Як видно з креслення, драм містить два прямих відрізки і дугу певного радіуса, що з'єднує відрізки. Це креслення може бути описане за допомогою кусково-неперервної функції. Такі функції були задані та візуалізовані в електронному ресурсі Desmos (рис. 3):

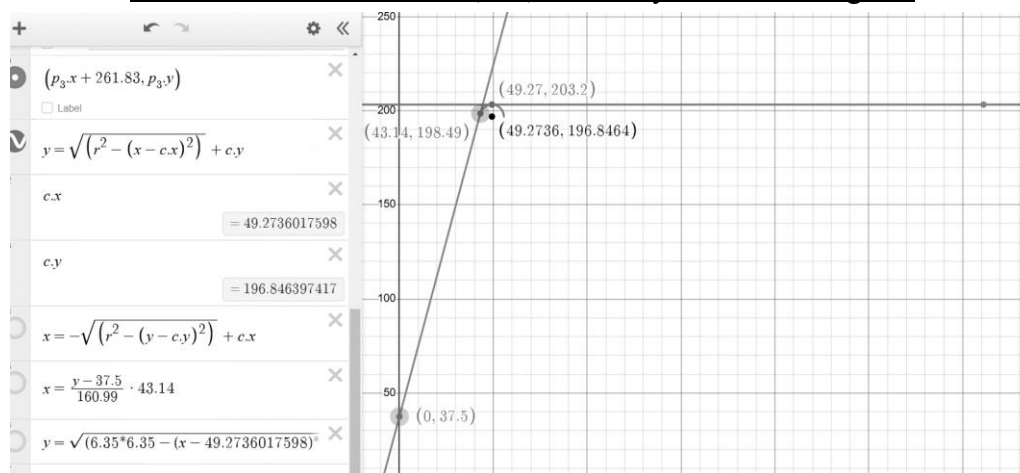


Рисунок 3 - Аналітичні функції форми циліндричного драма

Таким чином отримані аналітичні вирази функцій та їх область визначення, що створює неперервну геометричну форму циліндра в розрізі.

Нижче наведені аналітичні формули для кожної з частин драма:

Дно драма (відрізок прямої):

$$y = \frac{160.99}{43.14}x + 37.55, \quad x \in [0, 43.14] \quad (2)$$

Перехід від стінки до дна (дуга кола)

$$y = \sqrt{(r^2 - (x - 49.27)^2)} + 196.84, \quad x \in [43.14, 49.27), \quad (3)$$

де $r = 6.35$

Стінка драма (відрізок прямої)

$$y = 203.2, \quad x \in [49.27, 311.1] \quad (4)$$

Розбивши таку функцію на 3 відповідні частини розглянемо формули для підрахунку об'ємів тіл обертання:

$$V = \pi \int_a^b f(x)^2 dx \quad (5)$$

Підставляючи відповідні функції з відповідними границями інтегрування – отримаємо 3 об'єми які і будуть в сумі представляти весь об'єм драма.

Задача – знайти об'єм матеріалу, тобто об'єм геометричної фігури відтятої лінією рівня матеріалу від загального об'єму драма.

Тепер розглянемо лінію рівня матеріалу - така лінія завжди паралельна стінці драма і одним кінцем торкається дуги або відрізка дна в залежності від рівня y (рис. 4).

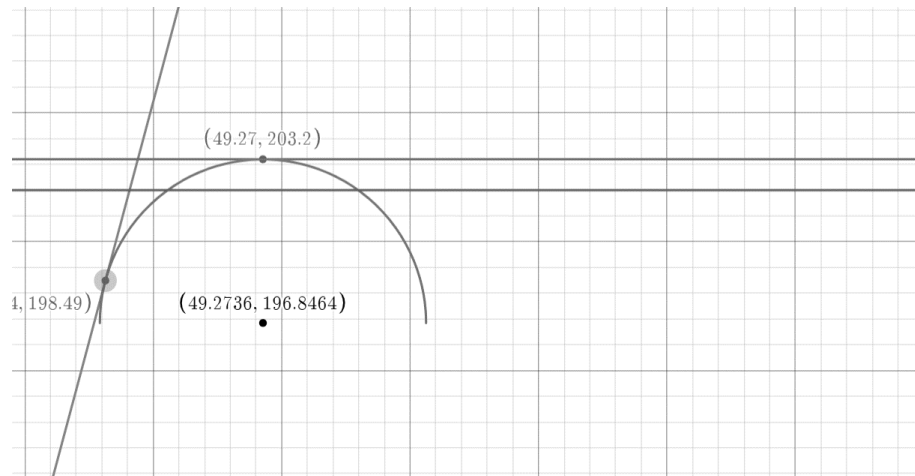


Рисунок 4- Візуалізація рівня матеріалу в циліндричному драмі

Першим кроком алгоритму є визначення перетину лінії рівня з кривою або прямою, що є частинами функції. Далі для даної кривої визначаються обернені функції для розрахунку x_0 – границі інтегрування знизу. Верхня границя інтегрування завжди буде відповідати правій точці інтервалу визначення даної функції. Далі для кожної частини – шуканий об'єм це різниця об'єму тіла обертання цієї частини функції та тіла обертання відрізка рівня паралельного осі Ox – тобто циліндра з відповідним радіусом.

Для прикладу, нижче зображена зафарбована частина об'єму, що враховується, коли лінія рівня перетинає дугу кола (рис. 5).

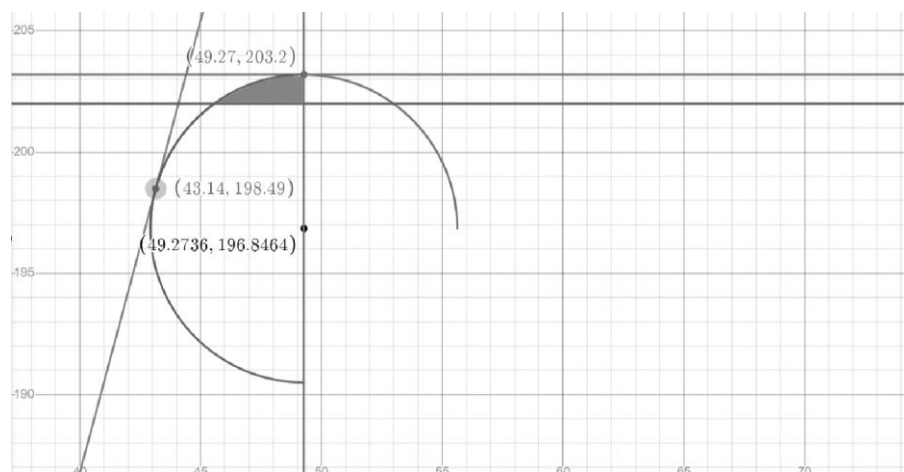


Рисунок 5 - Візуалізація об'єму для розрахунку за допомогою формул для тіл обертання

Після отримання результуючого об'єму треба розрахувати об'єм з шуканою лінією рівня і від нього відняти об'єм попереднього розрахунку.

Тепер розглянемо формули чисельного інтегрування, що були використані для розрахунків. Для інтегрування лінійної функції можна використовувати будь-який з відомих методів чисельного інтегрування, наприклад, правих прямокутників [4,5]. Але

для функції, що відповідає дузі кола, краще скористатися більш точним методом. В цій задачі величина похибки обмежена точністю насоса, який подає матеріал – насос може подавати матеріал з точністю до 0.01 мл, тож для чисельного інтегрування був обраний метод трапецій з кроком 0.01:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \sum_{i=0}^{n-1} \frac{f(x_i) + f(x_{i+1})}{2} (x_{i+1} - x_i) \quad (6)$$

Тестування алгоритму підрахунку проходило на реальних даних, де лінія матеріалу зміщувалась на сталий крок, який дорівнює висоті кожного шару $h = 0.05$. Нижче наведені результати розрахунків для формату джоби зі ста сорока п'яти шарів, де перше число – це індекс шару, друге – товщина шару в мм, третє – кількість матеріалу в мл:

0 0.05 16.8425	29 0.05 16.7861	58 0.05 16.6982	87 0.05 16.6001	116 0.05 16.5017
1 0.05 16.8413	30 0.05 16.7836	59 0.05 16.6948	88 0.05 16.5967	117 0.05 16.4983
2 0.05 16.84	31 0.05 16.7809	60 0.05 16.6914	89 0.05 16.5933	118 0.05 16.4949
3 0.05 16.8387	32 0.05 16.7783	61 0.05 16.688	90 0.05 16.59	119 0.05 16.4915
4 0.05 16.8373	33 0.05 16.7756	62 0.05 16.6847	91 0.05 16.5866	120 0.05 16.4881
5 0.05 16.8359	34 0.05 16.7729	63 0.05 16.6813	92 0.05 16.5832	121 0.05 16.4847
6 0.05 16.8343	35 0.05 16.7701	64 0.05 16.6779	93 0.05 16.5798	122 0.05 16.4813
7 0.05 16.8328	36 0.05 16.7673	65 0.05 16.6745	94 0.05 16.5764	123 0.05 16.4779
8 0.05 16.8311	37 0.05 16.7645	66 0.05 16.6712	95 0.05 16.573	124 0.05 16.4745
9 0.05 16.8295	38 0.05 16.7616	67 0.05 16.6678	96 0.05 16.5696	125 0.05 16.4711
10 0.05 16.8277	39 0.05 16.7587	68 0.05 16.6644	97 0.05 16.5662	126 0.05 16.4677
11 0.05 16.8259	40 0.05 16.7558	69 0.05 16.661	98 0.05 16.5628	127 0.05 16.4643
12 0.05 16.8241	41 0.05 16.7528	70 0.05 16.6576	99 0.05 16.5594	128 0.05 16.4609
13 0.05 16.8222	42 0.05 16.7498	71 0.05 16.6543	100 0.05 16.5561	129 0.05 16.4575
14 0.05 16.8203	43 0.05 16.7468	72 0.05 16.6509	101 0.05 16.5527	130 0.05 16.4541
15 0.05 16.8183	44 0.05 16.7438	73 0.05 16.6475	102 0.05 16.5493	131 0.05 16.4507
16 0.05 16.8163	45 0.05 16.7407	74 0.05 16.6441	103 0.05 16.5459	132 0.05 16.4473
17 0.05 16.8142	46 0.05 16.7376	75 0.05 16.6407	104 0.05 16.5425	133 0.05 16.4439
18 0.05 16.8121	47 0.05 16.7344	76 0.05 16.6374	105 0.05 16.5391	134 0.05 16.4405
19 0.05 16.8099	48 0.05 16.7313	77 0.05 16.634	106 0.05 16.5357	135 0.05 16.437
20 0.05 16.8077	49 0.05 16.7281	78 0.05 16.6306	107 0.05 16.5323	136 0.05 16.4336
21 0.05 16.8055	50 0.05 16.7249	79 0.05 16.6272	108 0.05 16.5289	137 0.05 16.4302
22 0.05 16.8032	51 0.05 16.7216	80 0.05 16.6238	109 0.05 16.5255	138 0.05 16.4268
23 0.05 16.8009	52 0.05 16.7183	81 0.05 16.6204	110 0.05 16.5221	139 0.05 16.4234
24 0.05 16.7985	53 0.05 16.715	82 0.05 16.6171	111 0.05 16.5187	140 0.05 16.42
25 0.05 16.7961	54 0.05 16.7117	83 0.05 16.6137	112 0.05 16.5153	141 0.05 16.4166
26 0.05 16.7937	55 0.05 16.7083	84 0.05 16.6103	113 0.05 16.5119	142 0.05 16.4132
27 0.05 16.7912	56 0.05 16.7049	85 0.05 16.6069	114 0.05 16.5085	143 0.05 16.4098
28 0.05 16.7887	57 0.05 16.7015	86 0.05 16.6035	115 0.05 16.5051	144 0.05 16.4064

Перевірка коректності розрахунків проходила на реальному друку, а товщину шарів на моделі перевіряли під мікроскопом. Нижче наведені фото моделей з мікроскопа (рис 6):

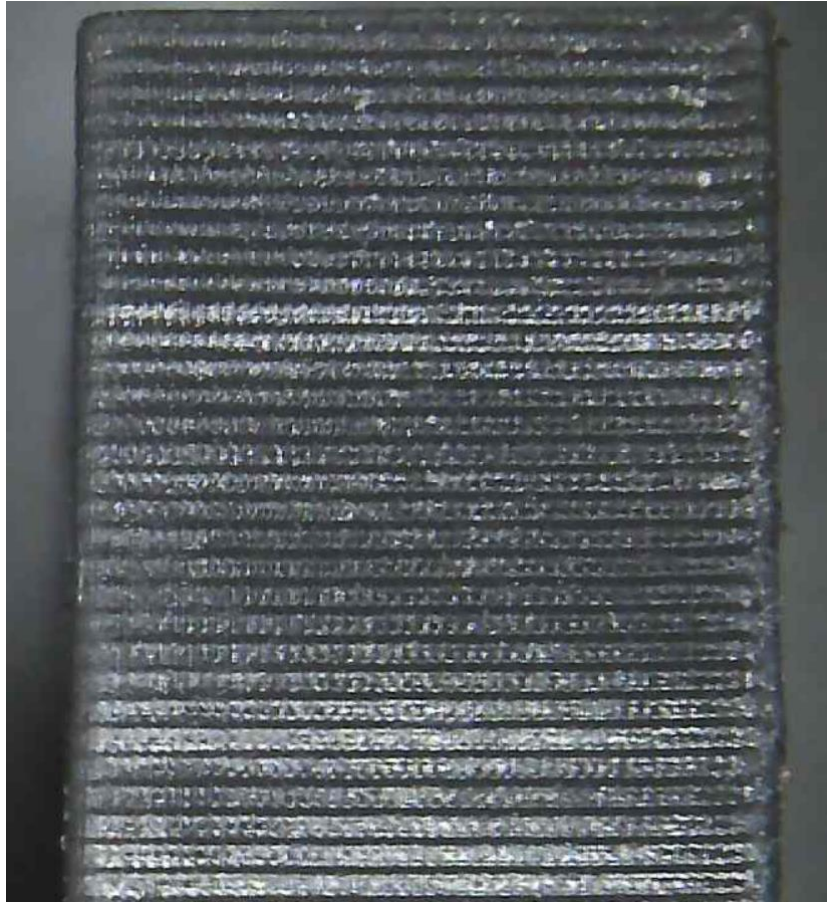


Рисунок 6 - Фото моделі з мікроскопа, побудованої з застосуванням наведених алгоритмів

Висновки. У статті розглянуто задачу подачі матеріалу для циліндричного 3D принтера Fugo, що є ключовим для забезпечення точності друку. Запропоновано алгоритм розрахунку об'єму матеріалу, який базується на формулах об'ємів тіл обертання для кусково-неперервної функції, що описують форму драма. Використано метод трапецій для чисельного інтегрування, що забезпечує точність, відповідну технічним вимогам насоса.

Алгоритм протестовано на реальних даних, результати підтвердили його коректність. Перевірка товщини шарів під мікроскопом показала високу точність розрахунків. Розроблений підхід дозволяє ефективно контролювати подачу матеріалу, що забезпечує якість друку. У подальшому планується вдосконалити алгоритм для складніших геометричних форм та різних матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сучасні методи адитивного виробництва тривимірних об'єктів на основі принтера типу FUGO: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, на тему «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем», 22-24 листопада 2023р, - Дніпро: ДНУ, 2023. - С. 318-319.
2. Задача подачі матеріалу для інноваційного циліндричного принтера типу FUGO: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, на тему «Математичне та про-

грамне забезпечення інтелектуальних систем», 22-24 листопада 2024р, - Дніпро: ДНУ, 2023. - С. 217-218.

3. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (І частина) / Г. О. Андрощук // Наука, технології, інновації. - 2017. - № 1. - С. 68-77.

4. Ahnert, K., Mulansky, M.: Odeint — Solving ordinary differential equations in C++. IP Conf. Proc. vol. 1389, pp. 1586–1589 (2011).

5. Ron Larson and Bruce H. Edwards. Calculus. Brooks/Cole, Belmont, ninth edition, 2010.

REFERENCES

1. Modern Methods of Additive Manufacturing of Three-Dimensional Objects Based on the FUGO-Type Printer: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference on "Mathematical and Software Support of Intelligent Systems," November 22-24, 2023, - Dnipro: DNU, 2023. - Pp. 318-319.

2. The Problem of Material Feeding for an Innovative Cylindrical Printer of the FUGO Type: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference on "Mathematical and Software Support of Intelligent Systems," November 22-24, 2024, - Dnipro: DNU, 2023. - Pp. 217-218.

3. Androshchuk, H. O. Additive Technologies: Prospects and Problems of 3D Printing (Part I) / H. O. Androshchuk // Science, Technologies, Innovations. - 2017. - No. 1. - Pp. 68-77.

4. Ahnert, K., Mulansky, M.: Odeint — Solving ordinary differential equations in C++. IP Conf. Proc. vol. 1389, pp. 1586–1589 (2011).

5. Ron Larson and Bruce H. Edwards. Calculus. Brooks/Cole, Belmont, ninth edition, 2010.

Received 12.03.2025.

Accepted 14.03.2025.

The task of ensuring material feeding for an innovative cylindrical printer of the Fugo type

Analysis of Recent Research and Publications. Additive manufacturing, or 3D printing, is one of the most dynamic fields in digital production, revolutionizing prototyping, small-scale manufacturing, and even household item production. The Fugo printer, with its unique cylindrical design, presents specific challenges in material feeding due to its rotating drum mechanism. Recent studies, such as those by "pro3d.com.ua," highlight the practical applications of 3D printing, while Androshchuk H.O. explores the economic and legal implications of additive technologies. These works underscore the importance of addressing material feeding challenges to optimize 3D printing processes.

Research Objective. The primary goal of this study is to develop a mathematical model for calculating the material volume required for each layer of a 3D-printed object, ensuring consistent layer thickness. This involves accounting for the drum's geometric complexity and the material's behavior during feeding. The proposed solution aims to improve the Fugo printer's performance by providing an algorithm that integrates numerical methods to achieve high precision in material volume calculations.

Presentation of the Main Research Material. The study focuses on the cylindrical drum of the Fugo printer, modeled as an ideal cylinder with specific geometric features. The algorithm calculates the material volume by determining the difference between the volumes of the

drum truncated at two material level lines. The drum's shape, described by piecewise continuous functions, includes straight segments and an arc, which were analyzed using the Desmos visualization tool. The trapezoidal method was chosen for numerical integration due to its balance of accuracy and computational efficiency, ensuring results within the pump's technical tolerances.

The algorithm was tested on real-world data, with the material feeding process simulated for 145 layers. The results demonstrated consistent and accurate material volume calculations, validated by microscopic examination of the printed layers. The proposed approach effectively controls material feeding, ensuring uniform layer thickness and high print quality.

Conclusions. This study addresses the critical challenge of material feeding in the Fugo cylindrical 3D printer by proposing a robust mathematical model and algorithm. The use of numerical integration, particularly the trapezoidal method, ensures accurate volume calculations, validated through practical testing. The results confirm the algorithm's effectiveness in controlling material feeding, which is essential for achieving high-quality 3D prints. Future work will focus on adapting the algorithm for more complex geometries and diverse materials, further enhancing the Fugo printer's capabilities.

Наконечна Тетяна Всеволодівна – к.ф.-м.н., доцент кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Орлов Станіслав Костянтинівич – аспірант кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Nakonechna Tetiana Vsevolodivna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Cybernetics of Oles Honchar Dnipro National University.

Orlov Stanislav Kostiantynovych – Postgraduate student of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Cybernetics of Oles Honchar Dnipro National University.

Є.В. Руксов, Б.І. Мороз

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОБОЧОГО МІСЦЯ КОНСТРУКТОРА АЕРОДИНАМІЧНИХ ВИРОБІВ

Анотація. Підвищення рівня автоматизації виробничих процесів завжди призводило до значного приросту ефективності виробництва, що в свою чергу викликало стрімкий економічний розвиток суспільства. Сфера виробництва аеродинамічних виробів вже зазнала автоматизації на різних етапах, проте фаза конструювання аеродинамічної форми виробу все ще потребує часових витрат вузькоспеціалізованого фахівця. Аеродинаміка є сферою великих складних математичних обчислень, а моделювання виробів із необхідними характеристиками все ще залишається здебільшого ручним процесом. Із розвитком машинного навчання ці складні процеси можуть бути в значній мірі автоматизовані. В цій статті проведено порівняльний аналіз різних напрацювань в сфері автоматизації конструювання аеродинамічних виробів. Впровадження таких технологій як PINNs та квантових обчислень на різних етапах конструювання аеродинамічних виробів за результатами порівняльного аналізу було визначено як найбільш перспективний напрямок для подальших досліджень.

Ключові слова: автоматизоване робоче місце, конструювання аеродинамічних виробів, нейронні мережі, PINNs, квантові обчислення, рівняння Нав'є-Стокса, 3D-моделювання, CFD.

Постановка проблеми. Автоматизоване робоче місце (АРМ) – це індивідуальний комплекс технічних і програмних засобів, що призначений для автоматизації професійної праці фахівця і забезпечує підготовку, редагування, пошук і видачу на екран і друк необхідних йому документів і даних. АРМ дозволяють підвищити ефективність роботи (тобто об'єм виконаної роботи за одиницю часу) працівника. Підвищення ефективності роботи, в загальному значенні, є одним з ключових факторів економічного прогресу в довгостроковій перспективі. Тому підвищення рівня автоматизації різних процесів, які необхідно виконати працівнику в рамках його роботи, може мати позитивний вплив на більш масштабні економічні фактори виробництва. З цього випливає високий рівень актуальності даної тематики для багатьох сфер виробничої діяльності.

Сфера конструювання виробів з певними аеродинамічними характеристиками має багато напрямків, які забезпечують виробництво широкого кола товарів. Автомобілі, літаки, БПЛА – найбільш популярні напрямки, які потребують складні та багаторівневі розрахунки для створення виробів з такими аеродинамічними характеристиками, які є прийнятними для відповідних задач та цілей. В аеродинаміці головним математичним

апаратом є рівняння Нав'є-Стокса, це диференційне рівняння в частинних похідних (ДРЧП), крім того, це рівняння є одним із невіршених «задач тисячоліття». Це показує на скільки складною з розрахункової точки зору є ця сфера виробництва.

Мета дослідження. Проаналізувати існуючі напрацювання в зазначеній сфері та визначити перспективні напрямки досліджень для підвищення рівня автоматизації АРМ конструктора аеродинамічних виробів (далі КАВ).

Методологія дослідження. Технічні засоби, які використовуються для організації АРМ, разом складають інформаційну систему (ІС). Така інформаційна система має ряд характеристик, які роблять її придатною для автоматизації конструювання аеродинамічних виробів. Серед цих характеристик можна виділити такі:

1. Точність – система повинна виконувати точні розрахунки.
2. Швидкодія – обчислення повинні бути достатньо швидкими.
3. Наочність результату – результат обчислень повинен мати такий вигляд, щоб інженер міг приймати рішення щодо подальших конструктивних змін виробу.
4. Повнота автоматизації – означає рівень залучення інформаційної системи до процесів конструювання (протилежність до «людського фактору»).

В залежності від типу виробництва технічні засоби в інформаційній системі АРМ відрізняються. Для конструювання аеродинамічних виробів необхідні такі технічні засоби, які забезпечують високі показники наведених вище характеристик інформаційної системи.

Методологія цього дослідження полягає в порівнянні існуючих напрацювань в даній сфері по заданим характеристикам ІС. Тому більша частина статті буде присвячена детальному аналізу існуючих досліджень та публікацій.

Опис стандартного АРМ КАВ. Розглянуте в цій статті АРМ в стандартному варіанті складається з декількох елементів. Загалом така ІС, як і будь-яка подібна інформаційна система, має дві основні складові: програмна та апаратна. До апаратної складової відносяться такі елементи:

1. Звичайний ПК, потужності якого буде достатньо для забезпечення роботи базового ПЗ. В стандартній конфігурації АРМ конструктора аеродинамічних виробів необхідні такі програмні засоби, які дозволять моделювати 3D-об'єкти.
2. 3D-принтер, який забезпечить натурне тестування зменшеної моделі майбутнього виробу.
3. Мала аеродинамічна труба дозволить інженеру одразу провести фізичне випробування надрукованого виробу.

3D-принтер та аеродинамічна труба – це апаратні засоби, які забезпечують швидке тестування результатів абстрактних та віртуальних розрахунків, які зроблені за допомогою програмних засобів. Така зв'язка апаратних засобів відкриває шляхи до пришвидшення процесу конструювання аеродинамічних виробів, а також до значної економії на польових тестах, адже зменшується кількість повномасштабних випробувань виробу, що зменшує витрати на повторні зборки прототипів.

До програмних засобів відносяться програми для створення та редагування тривимірних моделей. Таке ПЗ повинно бути забезпечене можливостями підтримки різних

форматів представлення 3D-моделей. Порівняння форматів представлення були описані в статті [1]. Зазначається, що в сучасній практиці найбільш оптимальним є представлення у форматі USD, яке відображає масив елементів mesh, зазвичай цими елементами виступають трикутники. Більшість сучасних програм для тривимірного моделювання (такі як Autodesk Maya, Autodesk 3ds Max, Blender, Cinema 4D) підтримуються цей формат. Ще одним критерієм для такого ПЗ є сумісність з 3D-принтерами та можливість експортувати модель на друк. Згадані програми мають такі можливості.

Ще один програмний засіб, який часто використовується в роботі конструктора аеродинамічних виробів, – це програма-симулятор типу CFD (Computational Fluid Dynamics). Ці програми дозволяють моделювати рідинні та газові потоки з певними характеристиками в певних умовах. У більшості таких програм є можливість помістити в динамічні потоки різні об'єкти, щоб виконати тестування та аналіз аеродинамічних характеристик 3D-моделі. Серед найбільш відомих програм такого типу можна виділити такі:

- ANSYS Fluent;
- COMSOL Multiphysics;
- OpenFOAM – з відкритим вихідним кодом;
- SimScale – розгорнутий в хмарі, має підтримку ШІ.

Ці програмні засоби здійснюють симуляцію поведінки аеродинамічної системи з певними початковими параметрами та за певний проміжок часу. Для виконання цього завдання необхідно вирішувати рівняння Нав'є-Стокса, яке є диференціальним рівнянням в частинних похідних. Як відомо, вирішення цього рівняння в загальному аналітичному вигляді відноситься до невіршених «задач тисячоліття», тому в реальних прикладних завданнях використовують числові методи і з певними статичними умовами для спеціальних випадків. Саме такі числові методи використовуються в програмах симуляції поведінки аеродинамічних систем. І це є основним ядром програм типу CFD.

Ще одним важливим компонентом програмної частини інформаційної системи АРМ конструктора аеродинамічних виробів є засоби візуалізації комп'ютерної симуляції поведінки аеродинамічної системи. Такі комерційні програмні комплекси, як ANSYS Fluent та COMSOL Multiphysics вже включають в себе засоби візуалізації. Проте насправді це є окремим програмним засобом, який повинен збирати великі об'єми параметрів симуляції та обчислювати візуальне представлення таких даних. Процес симуляції великих та складних аеродинамічних моделей генерує терабайти структурованих даних, які потрібно зберігати та виконувати над ними агрегацію задля створення візуального представлення у вигляді відео з можливостями детального аналізу кожного моменту часу в симуляції. Саме тому необхідні такі програмні засоби, які зможуть працювати на кластерах або суперкомп'ютерах. Найбільш популярні програмні засоби такого типу:

- ParaView – з відкритим вихідним кодом;
- VisIt – також з відкритим вихідним кодом;
- Tecplot – комерційний застосунок.

Також варто згадати про Visualization Toolkit (VTK) – це радше набір бібліотек та спеціальний формат представлення наукових даних для візуалізації симуляцій різного типу. Цей формат підтримується більшістю програм візуалізації та генерується більшістю програм симуляції.

Найбільш популярний та широко застосований програмний пакет для виконання задач CFD складається з OpenFOAM, ParaView та VTK. Ці програмні засоби є безкоштовними з відкритим вихідним кодом, що надає можливості для адаптування цих систем до поставлених задач.

На рисунку 1 представлена загальна схема АРМ конструктора аеродинамічних виробів з урахуванням всіх описаних апаратних та програмних засобів.

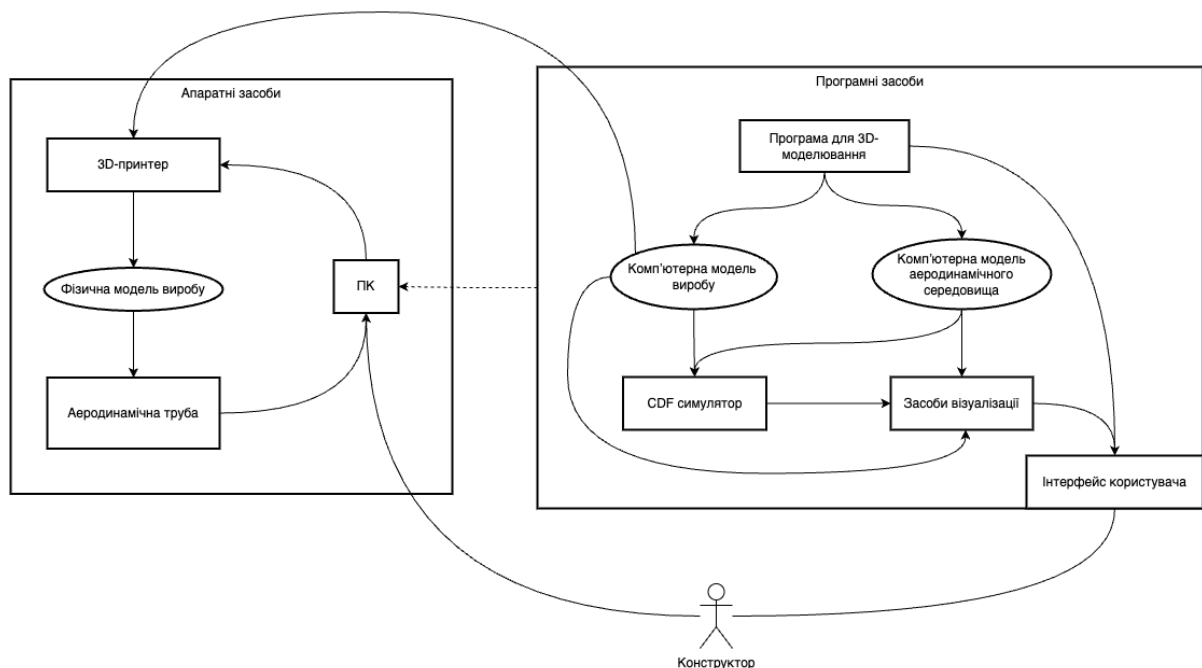


Рисунок 1 – Структурна схема базового варіанту АРМ КАВ

Опис вдосконаленого АРМ КАВ. Зазначений підхід дозволяє конструктору швидко оперувати апаратною складовою. Швидке створення фізичної моделі виробу значно скорочує процес конструювання та тестування аеродинамічного об'єкту в реальних умовах із зменшеним масштабом.

Проте в цій системі є декілька слабких місць, а саме ручні операції задля створення комп'ютерної моделі виробу, ці операції виконує конструктор за допомогою відповідних програмних засобів. Цей процес займає багато часу, від декількох годин до декількох днів.

Автоматична генерація тривимірних моделей може значно пришвидшити процес конструювання аеродинамічних виробів. Метод, який би отримувал на вході текстовий опис з певним набором очікуваних характеристик і на виході генерував 3D-модель потенційного виробу, дозволив би автоматизувати трудомісткий та затратний процес комп'ютерного моделювання. Вже існують такі методи на базі генеративних нейронних мереж (ГНМ). Описані в статтях [2, 3, 4, 5] методи мають великі перспективи в цій

сфері та потребують подальших досліджень та вдосконалень заради покращення якості генерованих об'єктів. Найбільш перспективною є модель PolyGen [5], яка може генерувати напряму представлення n -gon mesh, що скорочує загальний час створення кінцевого 3D-об'єкта, адже немає необхідності конвертувати з одного типу представлення в інший для подальшого 3D-друку. Крім того, n -gon mesh є більш оптимізованою версією mesh, яка збільшує точність кривизни тривимірного об'єкта.

Такі великі моделі машинного навчання потребують великих обчислювальних ресурсів, що в свою чергу значно збільшує витрати електроенергії. Для оптимізації цього процесу необхідно знайти методи зменшення розмірності задачі навчання нейронної мережі. Для цього треба зменшити кількість параметрів мережі, при цьому не знижуючи загальну ефективність мережі. Один з відомих підходів – це інтеграція квантових обчислень в процес тренування НМ. В статті [6] вперше були запропоновані методи часткової інтеграції квантових обчислень в НМ. Автори стверджують, що на даний момент не було виявлено переваг повністю квантових НМ над частково квантовими. Однак, був встановлений значний приріст ефективності частково квантових НМ в порівнянні з класичними НМ. Тому цей напрямок досліджень має багато перспектив, і наразі вже є багато зрушень у впровадженні квантових обчислень в різні типи моделей машинного навчання.

Ще одною проблемною точкою є CDF симулятор. І тут можна визначити одразу два недоліка: швидкодія та точність. Більшість сучасних симуляторів фізичних процесів працюють з числовими методами вирішення рівнянь Нав'є-Стокса у наближеному вигляді. Ці методи потребують великої кількості обчислень, що призводить до значних витрат часу. Безумовно, можна виконати горизонтальне розширення обчислювальних потужностей на базі кластеру, і цей функціонал підтримується такими програмними засобами як OpenFOAM. Проте це збільшить витрати електроенергії та зменшить мобільність такої системи. При цьому точність числових методів апроксимації падає при збільшенні невизначеності поставленої задачі, а саме при появі зашумленості в даних або відсутності частини початкових умов, або невизначений рівень дискретизації [7].

Для покращення швидкодії та точності CDF симуляторів варто розглянути вже існуючий спеціальний клас нейронних мереж (НМ), який покликаний обчислювати апроксимацію фізичних законів, включаючи рівняння Нав'є-Стокса для аеродинамічних симуляції. Цей клас НМ називається Physics-informed neural networks (PINNs) або в деяких джерелах ще називають Theory-Trained Neural Networks (TTNs), далі буде використовуватись перший варіант назви. Ці нейронні мережі використовуються для вирішення диференціальних рівнянь в частинних похідних [8, 9]. Ефективність такого методу в порівнянні зі звичайними числовими методами дозволяє експлуатувати таку НМ на менших обчислюваних потужностях, хоча для тренування мережі все ж потрібні значні ресурси.

Доцільність використання саме PINNs для вирішення задач математичної фізики була в певній мірі показана в статті [7]. Тут автори провели детальний порівняльний аналіз PINNs та класичних числових методів (а саме був розглянутий метод Кранка-

Ніколсон, один з методів скінченних різниць для вирішення ДРЧП) на прикладі вирішення таких рівнянь: рівняння теплопровідності, хвильові рівняння, рівняння Шредінгера, рівняння Нав'є-Стокса. Загалом результати цієї роботи показали перевагу в ефективності вирішення чітко сформульованих задач саме на боці числових методів. Проте для вирішення задач з підвищеним рівнем нечіткості даних та початкових умов PINNs мають певну перевагу в точності та загальній ефективності. В задачах з підвищеною розмірністю обидва об'єкти дослідження не показала великої різниці в ефективності. Певним недоліком PINNs є необхідність попереднього навчання НМ перед експлуатацією, що в загальному розрахунку ефективності грає негативну роль. Зрештою дослідження показало перспективність застосування PINNs для вирішення диференціальних рівнянь в частинних похідних за умов подальших вдосконалень цього методу.

PINNs з часу свого винайдення вже зазнали певної еволюції, хоча це відносно нова архітектура НМ. Певні покращення були запропоновані в статті [10]. Тут автори змогли розширити коло задач, для яких застосовуються НМ класу PINNs, зокрема запропонований підхід показав ефективність в апроксимації стаціонарних та залежних від часу лінійних диференціальних рівнянь в частинних похідних.

Автори іншої статті [11] пропонують модифікацію PINNs під назвою CAN-PINN. Ця робота відкриває напрямки оптимізації PINNs, який комбінує класичні числові методи та НМ, досягаючи цим покращення ефективності та точності алгоритму. В статті детально описані результати експериментів: автори порівняли новий підхід з класичними версіями PINNs на прикладі вирішення рівнянь Нав'є-Стокса, у висновках зазначається значна перевага в ефективності та точності запропонованого методу. Також цей тип НМ має потенціал для подальшого розширення сфер застосування для інших типів ДРЧП.

Через витратність навчання великих НМ на складних даних запропоновані підходи можуть бути недостатньо раціональними з точки зору енергоефективності. Проте вже є напрямки досліджень, які відкривають нові можливості в цій сфері. Зокрема, вже існують методи інтеграції квантових обчислень в навчання PINNs. В статті [12] зазначається, що квантові алгоритми дозволяють зменшити кількість параметрів для тренування до 63,29%. Це знижує загальне навантаження на обчислювальні потужності, як результат призводить до зменшення енергоспоживання під час тренування НМ. Однак цей підхід потребує подальших досліджень, адже в зазначеній статті не вистачає аналізу доцільності застосування квантових обчислень для навчання PINNs.

Загалом, цей тип машинного навчання зараз зазнає активних досліджень в багатьох аспектах. Застосування НМ для вирішення задач математичної фізики відкриває нові можливості для впровадження більш точних та швидких програмних засобів, якими зможуть користуватися конструктори аеродинамічних виробів.

На основі зібраних даних щодо можливих напрямків вдосконалення програмних засобів АРМ КАВ можна побудувати структурну схему вдосконаленого АРМ КАВ. Ця схема зображена на рисунку 2.

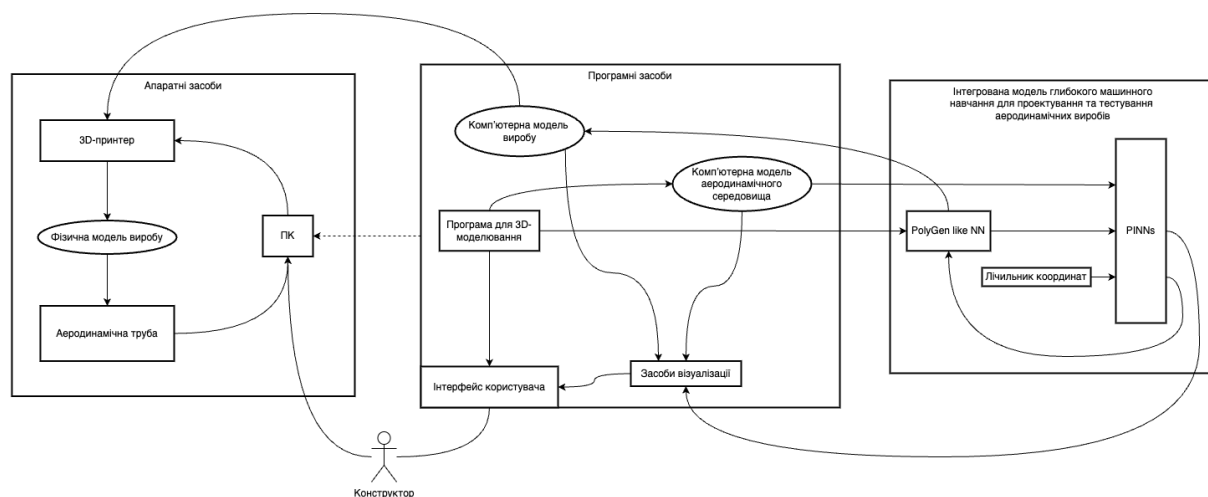


Рисунок 2 – Структурна схема вдосконаленого варіанту АРМ КАВ

Як видно зі структурної схеми, додався окремий блок під назвою «інтегрована модель глибокого машинного навчання для проектування та тестування аеродинамічних виробів», та зник CDF симулятор як окремий структурний елемент схеми, який насправді деталізований в новому блоці. Новий блок складається з двох великих НМ: «PolyGen like NN» та PINNs. Перша НМ безпосередньо генерує комп'ютерну модель виробу на основі, заданого через програму для 3D-моделювання (саме тому новий структурний блок має в своїй назві слово «інтегрована»), текстового опису та технічних характеристик бажаного виробу, а також ця модель має адаптивний механізм у відповідь на реакцію аеродинамічного середовища, яке формується другою НМ. PINNs отримує на вході, створену звичайними методами, комп'ютерну модель аеродинамічного середовища, згенеровану модель виробу, просторово-часові координати від лічильника координат, який запускає PINNs в ітеративному режимі задля створення повної симуляції аеродинамічного середовища, яке буде відображене засобами візуалізації.

Мережа «PolyGen like NN» є частково натренованою на генерування тривимірних об'єктів на основі текстового опису, однак вона має адаптивні властивості по типу НМ з підкріпленням. Загалом, ця НМ забезпечує аспект проектування аеродинамічного виробу в рамках відповідного структурного блоку.

PINNs є повністю натренованою модифікацією НМ, яка апроксимує рішення рівняння Нав'є-Стокса для певних вхідних умов. Загалом, ця НМ відображає аспект тестування аеродинамічного виробу в симульованому середовищі, що є частиною відповідного структурного блоку схеми.

Висновки. В результаті аналізу існуючих НМ описаних типів, наразі не було виявлено таких конфігурацій мереж, які б задовольнили всі аспекти поставлених задач. Тому запропонована на рисунку 2 структурна схема не є повною, а лише концептуальною. Більш детальна архітектура та функціонування кожної з НМ потребують подальшого дослідження та вдосконалення. В цій статті задані лише можливі вектори подальших досліджень. На основі порівняльного аналізу існуючих напрацювань в цій сфері були розглянуті різні методи та засоби автоматизації процесу 3D-моделювання, з чого

була запропонована загальна архітектура інформаційної системи АРМ КАВ. За результатами подальших досліджень ця архітектура може зазнавати відповідних змін та вдосконалень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Методи представлення 3d-об'єктів для навчання генеративних нейронних мереж. Євгеній Руксов, Борис Мороз, Леонід Кабак, Дмитро Мороз. – Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, 2024. – 12 с. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-1-8>.
2. 3D-R2N2: A Unified Approach for Single and Multi-view 3D Object Reconstruction. Christopher B. Choy, Danfei Xu, JunYoung Gwak, Kevin Chen, Silvio Savarese. – Archive of scientific articles arXiv, 2016. – 17 с. arXiv: 1604.00449.
3. AtlasNet: A Papier-Mache Approach to Learning 3D Surface Generation. Thibault Groueix, Matthew Fisher, Vladimir G. Kim, Bryan C. Russell, Mathieu Aubry. – Archive of scientific articles arXiv, 2018. – 16 с. arXiv: 1802.05384.
4. Occupancy Networks: Learning 3D Reconstruction in Function Space. Lars Mescheder, Michael Oechsle, Michael Niemeyer, Sebastian Nowozin, Andreas Geiger. – Archive of scientific articles arXiv, 2019. – 11 с. arXiv: 1812.03828.
5. PolyGen: An Autoregressive Generative Model of 3D Meshes. Charlie Nash, Yaroslav Ganin, S. M. Ali Eslami, Peter W. Battaglia. – Archive of scientific articles arXiv, 2020. – 16 с. arXiv: 2002.10880.
6. Quantum artificial neural network architectures and components. Ajit Narayanan, Tammy Menner. – Informatics and Computer Science Intelligent Systems Applications. An International Journal, 2000. – 24 с. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(00\)00055-4](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(00)00055-4).
7. Comparison between classical numerical methods and methods based on Deep Learning for solving PDEs. Marcos Freire Patiño, Ana María Ferreiro Ferreiro, José Antonio García Rodríguez. – Дипломна робота з комп'ютерної інженерії. Університет Ла-Коруња. Іспанія, 2024. – 75 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/39635/FreirePatino_Marcos_TFG_2024.pdf.
8. Physics Informed Deep Learning (Part I): Data-driven Solutions of Nonlinear Partial Differential Equations. Maziar Raissi, Paris Perdikaris, George Em Karniadakis. – Archive of scientific articles arXiv, 2017. – 22 с. arXiv: 1711.10561.
9. Physics Informed Deep Learning (Part II): Data-driven Solutions of Nonlinear Partial Differential Equations. Maziar Raissi, Paris Perdikaris, George Em Karniadakis. – Archive of scientific articles arXiv, 2017. – 19 с. arXiv: 1711.10566.
10. Physics Informed Extreme Learning Machine (PIELM) – a rapid method for the numerical solution of partial differential equations. Vikas Dwivedi, Balaji Srinivasan. – Archive of scientific articles arXiv, 2019. – 29 с. arXiv: 1907.03507.
11. CAN-PINN: A Fast Physics-Informed Neural Network Based on Coupled-Automatic-Numerical Differentiation Method. Pao-Hsiung Chiu, Jian Cheng Wong, Chinchun Ooi, My Ha Dao, Yew-Soon Ong. – Archive of scientific articles arXiv, 2022. – 25 с. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.114909>.

12. AQ-PINNs: Attention-Enhanced Quantum Physics-Informed Neural Networks for Carbon-Efficient Climate Modeling. Siddhant Dutta, Nouhaila Innan, Sadok Ben Yahia, Muhammad Shafique. – Archive of scientific articles arXiv, 2024. – 6 с. arXiv: 2409.01626.

REFERENCES

1. Methods of representation of 3d objects for learning generative neural networks. Yevhenii Ruksov, Borys Moroz, Leonid Kabak, Dmytro Moroz. – Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, 2024. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-1-8>.
2. 3D-R2N2: A Unified Approach for Single and Multi-view 3D Object Reconstruction. Christopher B. Choy, Danfei Xu, JunYoung Gwak, Kevin Chen, Silvio Savarese. – Archive of scientific articles arXiv, 2016. – 17 p. arXiv: 1604.00449.
3. AtlasNet: A Papier-Mache Approach to Learning 3D Surface Generation. Thibault Groueix, Matthew Fisher, Vladimir G. Kim, Bryan C. Russell, Mathieu Aubry. – Archive of scientific articles arXiv, 2018. – 16 p. arXiv: 1802.05384.
4. Occupancy Networks: Learning 3D Reconstruction in Function Space. Lars Mescheder, Michael Oechsle, Michael Niemeyer, Sebastian Nowozin, Andreas Geiger. – Archive of scientific articles arXiv, 2019. – 11 p. arXiv: 1812.03828.
5. PolyGen: An Autoregressive Generative Model of 3D Meshes. Charlie Nash, Yaroslav Ganin, S. M. Ali Eslami, Peter W. Battaglia. – Archive of scientific articles arXiv, 2020. – 16 p. arXiv: 2002.10880.
6. Quantum artificial neural network architectures and components. Ajit Narayanan, Tammy Menner. – Informatics and Computer Science Intelligent Systems Applications. An International Journal, 2000. – 24 p. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(00\)00055-4](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(00)00055-4).
7. Comparison between classical numerical methods and methods based on Deep Learning for solving PDEs. Marcos Freire Patiño, Ana María Ferreiro Ferreiro, José Antonio García Rodríguez. – Diploma work in computer engineering. University of A Coruña. Spain, 2024. – 75 p.
URL: https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/39635/FreirePatino_Marcos_TFG_2024.pdf.
8. Physics Informed Deep Learning (Part I): Data-driven Solutions of Nonlinear Partial Differential Equations. Maziar Raissi, Paris Perdikaris, George Em Karniadakis. – Archive of scientific articles arXiv, 2017. – 22 p. arXiv: 1711.10561.
9. Physics Informed Deep Learning (Part II): Data-driven Solutions of Nonlinear Partial Differential Equations. Maziar Raissi, Paris Perdikaris, George Em Karniadakis. – Archive of scientific articles arXiv, 2017. – 19 p. arXiv: 1711.10566.
10. Physics Informed Extreme Learning Machine (PIELM) – a rapid method for the numerical solution of partial differential equations. Vikas Dwivedi, Balaji Srinivasan. – Archive of scientific articles arXiv, 2019. – 29 p. arXiv: 1907.03507.
11. CAN-PINN: A Fast Physics-Informed Neural Network Based on Coupled-Automatic-Numerical Differentiation Method. Pao-Hsiung Chiu, Jian Cheng Wong, Chinchun Ooi, My Ha Dao, Yew-Soon Ong. – Archive of scientific articles arXiv, 2022. – 25 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.114909>.

12. AQ-PINNs: Attention-Enhanced Quantum Physics-Informed Neural Networks for Carbon-Efficient Climate Modeling. Siddhant Dutta, Nouhaila Innan, Sadok Ben Yahia, Muhammad Shafique. – Archive of scientific articles arXiv, 2024. – 6 p. arXiv: 2409.01626.

Received 12.03.2025.
Accepted 14.03.2025.

***Analysis of methods for increasing the level of automation
in an aerodynamic product designer's workplace***

Increasing the level of automation of production processes has always led to a significant increase in production efficiency, which in turn has caused the rapid economic development of society. The field of designing products with certain aerodynamic characteristics has many areas that ensure the production of a wide range of goods. Cars, airplanes, UAVs are the most popular areas that require complex and multi-level calculations to create products with such aerodynamic characteristics that are acceptable for the relevant tasks and purposes. In aerodynamics, the main mathematical apparatus is the Navier-Stokes equation, this is a partial differential equation (PDE), in addition, this equation is one of the unsolved "millennium problems". This shows how complex this field of production is from a computational point of view. Although it has already undergone automation at various stages, the phase of designing the aerodynamic shape of the product still requires the time of a narrowly specialized professional, because modeling products with the necessary characteristics still remains mostly a manual process. With the development of machine learning, these complex processes can be largely automated. This article presents a comparative analysis of various developments in the field of automation of aerodynamic product design. The introduction of technologies such as PINNs and quantum computing at different stages of aerodynamic product design, based on the results of the comparative analysis, was identified as the most promising direction for further research. The general architecture of an improved version of the information system of the automated workplace of the aerodynamic product designer is also proposed. In future research, this architecture may undergo appropriate changes and improvements.

Key words: automated workplace, aerodynamic product design, neural networks, PINNs, quantum computing, Navier-Stokes equations, 3D modeling, CFD.

Руксов Євгеній Вікторович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем факультету інформаційних технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Мороз Борис Іванович – д.т.н., професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем факультету інформаційних технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Ruksov Yevhenii Viktorovych – PhD Student at the Department of Computer Systems Software, Faculty of Information Technology, National Technical University “Dnipro Polytechnic”, Ukraine.

Moroz Borys Ivanovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Systems Software, Faculty of Information Technology, National Technical University “Dnipro Polytechnic”, Ukraine.

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦІЇ
СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК
КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНІЙ МАШИНИ**

Анотація Сучасні координатно-вимірювальні машини (КВМ) забезпечують високу точність вимірювань, однак на практиці їх метрологічні характеристики погіршуються через вплив систематичних похибок, спричинених геометричними, температурними та кінематичними факторами. Актуальність дослідження обумовлена потребою підвищення точності координатних вимірювань шляхом створення математичних моделей компенсації систематичних похибок. У статті поставлено проблему формування комплексної моделі систематичних похибок КВМ та розробки алгоритму їхньої автоматизованої компенсації. Метою дослідження є розроблення математичної моделі систематичних похибок та побудова алгоритму їхньої корекції на основі багатofакторного аналізу. Для досягнення мети застосовано методи математичного моделювання, теорії похибок та чисельної оптимізації. У результаті створено алгоритм автоматизованої компенсації, що дозволяє значно зменшити похибки при вимірюванні складних поверхонь. Запропоновані підходи можуть бути інтегровані у програмне забезпечення КВМ.

Ключові слова: координатно-вимірювальна машина, систематичні похибки, математична модель, компенсація похибок, геометричні похибки, температурні впливи, алгоритм корекції, багатofакторний аналіз, точність вимірювань, метрологічне забезпечення, система керування.

Забезпечення високої точності вимірювань на КВМ є одним із ключових завдань сучасної метрології та виробничого контролю. Систематичні похибки, що виникають у процесі роботи КВМ, можуть суттєво спотворювати результати вимірювань, особливо при контролі складних та високоточних деталей. Їхні джерела — це поєднання геометричних неточностей, температурних деформацій, похибок приводів та сенсорів, а також міжосьових взаємодій. Ефективна компенсація таких похибок потребує комплексного підходу, що базується на математичному моделюванні всього комплексу систематичних відхилень та створенні алгоритмів реального часу для їх корекції.

Постановка проблеми. Високоточні КВМ є незамінними при контролі геометричних параметрів складних деталей у машинобудуванні, авіаційній та космічній галузях. Однак на точність вимірювань впливають численні систематичні похибки, пов'язані з

геометричними неточностями конструкції, температурною деформацією елементів, нестабільністю приводів та сенсорів.

У науковій літературі значна увага приділяється питанням підвищення точності КВМ. Зокрема, у роботах [1, 2] досліджено вплив температурних змін на просторову геометрію машини та запропоновано температурну компенсацію. Роботи [3, 4] присвячені математичному моделюванню геометричних похибок, які виникають через неточність виготовлення направляючих та приводів. Методи статистичної обробки даних для ідентифікації систематичних похибок розглянуто у працях [5, 6]. Проте, недостатньо висвітлено питання побудови єдиної математичної моделі, яка б враховувала усі основні джерела систематичних похибок та забезпечувала їхню оперативну компенсацію в режимі реального часу. Існуючі методи компенсації мають обмежену ефективність через складність просторових деформацій та взаємодію різних джерел похибок [7,8]. Це обумовлює необхідність створення комплексної математичної моделі систематичних похибок КВМ та розробки алгоритму їхньої компенсації для забезпечення високої точності вимірювань.

Мета дослідження. Метою дослідження є створення математичної моделі систематичних похибок координатно-вимірювальних машин та розроблення алгоритму їх автоматизованої компенсації для підвищення точності координатних вимірювань.

Формування математичної моделі систематичних похибок. Систематичні похибки КВМ формуються під впливом різних факторів, які можна поділити на геометричні похибки, спричинені неточностями складання, виробничими дефектами направляючих та базових елементів. Температурні деформації – зміни геометрії під впливом температурного поля. Кінематичні похибки, пов'язані з нерівномірністю переміщення приводів, люфтами та гістерезисом. Комплексна систематична похибка для вимірюваних координат x, y, z може бути представлена у вигляді:

$$\delta_{total}(x, y, z, T) = \delta_{geom}(x, y, z) + \delta_{temp}(x, y, z, T) + \delta_{kin}(x, y, z), \quad (1)$$

де: $\delta_{geom}(x, y, z)$ — геометричні похибки, $\delta_{temp}(x, y, z, T)$ — температурні деформації, функція температури T , $\delta_{kin}(x, y, z)$ — кінематичні похибки.

Геометричні похибки для кожної осі можна подати у вигляді:

$$\delta_{geom}(x, y, z) = \begin{bmatrix} \delta_x(x, y, z) \\ \delta_y(x, y, z) \\ \delta_z(x, y, z) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для кожної осі модель включає складові: відхилення прямолінійності, кутові похибки, перехресні впливи між осями (абатмент). Наприклад, для осі X з урахуванням обертів навколо Y та Z :

$$\begin{aligned} \delta_x(x, y, z) &= e_x(x) + y \cdot \theta_z(x) - z \cdot \theta_y(x) \\ \delta_y(x, y, z) &= e_y(x) + y \cdot \theta_y(x) \\ \delta_z(x, y, z) &= e_z(x) + z \cdot \theta_x(x) \end{aligned}, \quad (3)$$

де $e_x(x), e_y(x), e_z(x)$ — лінійні похибки положення, $\theta_x(x), \theta_y(x), \theta_z(x)$, — кутові похибки.

Температурні деформації

Температурна похибка залежить від розподілу температури та температурних градієнтів у конструкції машини. Для кожної осі:

$$\delta_{temp}(x, y, z, T) = \alpha \cdot \int_L \nabla T(x', y', z') dL, \quad (4)$$

де α — коефіцієнт температурного розширення матеріалу, ∇T — температурний градієнт уздовж направляючих.

У дискретному вигляді:

$$\delta_{temp}(x, y, z, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot \Delta T_i \cdot l_i, \quad (5)$$

де: N — кількість відрізків направляючої, ΔT_i — локальне температурне відхилення на i -й ділянці, l_i — довжина ділянки.

Також можна враховувати нелінійні температурні впливи через розширений поліном:

$$\delta_{temp}(x, y, z, T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n. \quad (6)$$

Кінематичні похибки. Виникають через люфти, гістрезис та неідеальні профілі направляючих. Ці фактори є основними джерелами систематичних похибок, які проявляються під час переміщення рухомих вузлів КВМ. Люфти в напрямних викликають нерівномірність переміщення, особливо при зміні напрямку руху, що призводить до зсувів вимірних координат відносно їхнього реального положення. Гістрезис обумовлений як внутрішніми пружними деформаціями у вузлах машини, так і наявністю залишкових напружень у матеріалі конструкційних елементів, що спричиняє залежність поточного положення від попередньої траєкторії руху. Для кожної координати вони можуть бути описані через функції положення та швидкості:

$$\delta_{kin}(x, y, z) = k_x \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{L_x}\right) + k_y \cdot \sin\left(\frac{2\pi y}{L_y}\right) + k_z \cdot \sin\left(\frac{2\pi z}{L_z}\right), \quad (7)$$

де: k_x, k_y, k_z — амплітуди кінематичних похибок, L_x, L_y, L_z — довжини ходу по кожній осі. Також можливе врахування гістрезису при зміні напрямку руху:

$$\delta_{hyst}(x, v_x) = H_x \cdot \text{sign}(v_x), \quad (8)$$

де: H_x — величина гістрезису для осі, v_x — швидкість руху по осі X .

Врахування цих факторів у математичній моделі дозволяє суттєво підвищити точність координатних вимірювань шляхом компенсації накопичених систематичних відхилень у реальному часі, зокрема при проведенні високошвидкісних скануючих вимірювань або при контролі деталей складної просторової форми.

Інтегрована модель. Загальна модель систематичних похибок з урахуванням всіх чинників набуває вигляду:

$$\delta_{total}(x, y, z, T, v_x, v_y, v_z) = \begin{bmatrix} \delta_x(x, y, z, T, v_x) \\ \delta_y(x, y, z, T, v_y) \\ \delta_z(x, y, z, T, v_z) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де кожна складова містить:

$$\delta_x(x, y, z, T, v_x) = \delta_{geom,x}(x, y, z) + \delta_{temp,x}(x, y, z, T) + \delta_{kin,x}(x, y, z) + \delta_{hyst}(x, v_x). \quad (10)$$

Аналогічно для y та z :

$$\begin{aligned} \delta_y(x, y, z, T, v_y) &= \delta_{geom,y}(x, y, z) + \delta_{temp,y}(x, y, z, T) + \delta_{kin,y}(x, y, z) + \delta_{hyst}(y, v_y) \\ \delta_z(x, y, z, T, v_z) &= \delta_{geom,z}(x, y, z) + \delta_{temp,z}(x, y, z, T) + \delta_{kin,z}(x, y, z) + \delta_{hyst}(z, v_z) \end{aligned} \quad (11)$$

Врахування міжосьових зв'язків. Оскільки у багатьох КВМ направляючі не є строго ортогональними, модель доповнюється міжосьовими зсувами:

$$\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де: \mathbf{R} — матриця міжосьових впливів (неортогональність осей):

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & r_{xy} & r_{xz} \\ r_{yx} & 1 & r_{yz} \\ r_{zx} & r_{zy} & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Узагальнення. Повна формула для кожної координати враховує:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x + \delta_x(x, y, z, T, v_x) \\ \tilde{y} &= y + \delta_y(x, y, z, T, v_y) \\ \tilde{z} &= z + \delta_z(x, y, z, T, v_z) \end{aligned} \quad (14)$$

$\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$ — скориговані координати після компенсації.

Узагальнюючи всі вищенаведені фактори та їхній вплив на точність вимірювань, можна сформулювати повну математичну модель для кожної координати, яка враховує геометричні похибки направляючих, температурні деформації, люфти, гістрезис, міжосьові паразитні переміщення та динамічні похибки, що виникають при русі. Таким чином, скориговані координати після компенсації є результатом багатофакторного коригування, яке дозволяє суттєво знизити рівень систематичних похибок і забезпечити високу точність координатних вимірювань навіть у складних умовах експлуатації КВМ. Це створює передумови для підвищення метрологічної надійності вимірювальної системи та забезпечення стабільної якості контролю складних деталей на всіх етапах виробництва.

Алгоритм компенсації систематичних похибок. Алгоритм компенсації систематичних похибок КВМ у вигляді блок-схеми показано на рисунку 1.



Рисунок 1 - Алгоритм компенсації систематичних похибок

Алгоритм включає такі етапи:

1. Первинне калібрування системи. Виконати повне калібрування КВМ для визначення геометричних похибок напрямних та лінійних переміщень, кутових похибок для кожної осі, визначити міжосьові впливи. Виміряти температурний профіль у робочій зоні машини. Розрахувати температурні градієнти.

2. Формування бази даних систематичних похибок. Провести серію тестових вимірювань для побудови матриці похибок у дискретних точках простору. Створити тривимірну інтерполяційну сітку (таблицю) систематичних похибок:

$$\delta_{ijk} = \delta_{total}(x_i, y_j, z_k), \quad (15)$$

де i, j, k — індекси координатної сітки.

3. Побудова математичної моделі. Об'єднати окремі моделі похибок у єдину інтегровану модель (1). Реалізувати модель у вигляді функції:

$$\delta = f(x, y, z, T, v) \quad (16)$$

де T — температура, v — вектор швидкостей переміщення по осях.

4. Зчитування поточних координат та умов. Під час кожного вимірювання зчитуються: Поточні координати: x, y, z , поточна температура: T , швидкості переміщення по кожній осі: v_x, v_y, v_z .

5. Обчислення систематичної похибки в поточній точці. На основі поточних координат, температури та швидкості обчислюється систематична похибка за формулою:

$$\delta_x = \delta_{geom,x} + \delta_{temp,x} + \delta_{kin,x} + \delta_{hyst}(x, v_x) \quad (17)$$

(Аналогічно для осей y та z).

6. Корекція координат є завершальним етапом процесу компенсації систематичних похибок КВМ, що забезпечує підвищення точності кінцевих результатів вимірювань. На основі побудованої математичної моделі та отриманих даних про поточне положення вузлів машини, температурні умови, швидкість руху, а також врахування попередніх траєкторій переміщення, для кожної координати обчислюється сумарна систематична похибка. Розрахована сукупна похибка додається до координат, отриманих під час вимірювання, в режимі реального часу. У результаті формуються скориговані координати, які максимально наближені до дійсних значень вимірюваних точок.

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x + \delta x \\ \tilde{y} &= y + \delta y. \\ \tilde{z} &= z + \delta z \end{aligned} \quad (18)$$

Крок 7. Збереження результатів та формування звіту. Запис скоригованих координат у вихідний протокол вимірювань. Додатково може формуватись звіт із інформацією про величину внесених поправок для кожної точки.

Крок 8. Адаптивне уточнення моделі. Після накопичення статистики (серії вимірювань) можлива корекція параметрів моделі на основі порівняння номінальних та скоригованих значень. Використання методів зворотного зв'язку для уточнення залежностей:

$$\delta_{corr}(x, y, z) = \delta_{model}(x, y, z) + \Delta\delta_{adaptive}(x, y, z) \quad (19)$$

Адаптивне уточнення моделі дозволяє підвищити її точність та адекватність шляхом постійного аналізу результатів вимірювань у реальних умовах експлуатації. Порівняння номінальних координат еталонних об'єктів з отриманими скоригованими значеннями дає змогу виявити залишкові систематичні похибки та внести коригування до параметрів математичної моделі.

Висновки. Запропонована математична модель систематичних похибок КВМ дозволяє врахувати основні джерела похибок, зокрема геометричні, температурні та кінематичні. Розроблений алгоритм автоматизованої компенсації забезпечує значне підвищення точності вимірювань, особливо при вимірюванні великогабаритних та складнопрофільних деталей. Отримані результати можуть бути використані при модернізації існуючих КВМ та створенні нових систем вимірювань із підвищеною точністю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Романенко С. Ю., Костриця С. М., Карлаш Ю. М. Автоматизована система визначення та компенсації похибок координатно-вимірювальних машин. Прилади та методи вимірювань. 2017. Т. 8, № 2. С. 59–66.
2. Ляшенко А. А., Бородин Є. А., Дрогобецький С. А. Метрологічне забезпечення високоточного вимірювання на координатно-вимірювальних машинах. Вимірювальна техніка та метрологія. 2019. № 80. С. 44–52.
3. Белоконь М. В. Компенсація систематичних похибок координатно-вимірювальних машин на основі багатофакторної моделі. Вісник ХНУРЕ. 2020. № 2 (105). С. 24–29.
4. Weckenmann A., Estler T., Peggs G., McMurtry D. Probing systems in dimensional metrology. CIRP Annals. 2004. Vol. 53, No. 2. P. 657–684.
5. Trapet E., Savio E., De Chiffre L. Uncertainty in Coordinate Measuring Machines. CIRP Annals. 1999. Vol. 48, No. 2. P. 517–534.
6. Вороніна Н. О., Шевченко О. П., Куликов І. В. Математичне моделювання похибок координатно-вимірювальних машин. Сучасні технології в машинобудуванні. 2018. № 10. С. 55–62.
7. Кривошей І. О., Головань С. В. Температурні деформації як джерело систематичних похибок координатно-вимірювальних машин. Вимірювальна техніка. 2016. № 3. С. 32–36.
8. Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Welzel M., Just A. Geometric error measurement and compensation of machines—An update. CIRP Annals. 2008. Vol. 57, No. 2. P. 660–675.

REFERENCE

1. Romanenko, S. Yu., Kostrytsia, S. M., & Karlash, Yu. M. (2017). Automated system for determining and compensating coordinate measuring machine errors. *Instruments and Measurement Methods*, 8(2), 59–66.
2. Lyashenko, A. A., Borodin, Ye. A., & Drogobetskyi, S. A. (2019). Metrological support of high-precision measurements on coordinate measuring machines. *Measuring Equipment and Metrology*, (80), 44–52.

3. Belokon, M. V. (2020). Compensation of systematic errors of coordinate measuring machines based on a multifactor model. *Bulletin of Kharkiv National University of Radio Electronics*, 2(105), 24–29.
4. Weckenmann, A., Estler, T., Peggs, G., & McMurtry, D. (2004). Probing systems in dimensional metrology. *CIRP Annals*, 53(2), 657–684.
5. Trapet, E., Savio, E., & De Chiffre, L. (1999). Uncertainty in coordinate measuring machines. *CIRP Annals*, 48(2), 517–534.
6. Voronina, N. O., Shevchenko, O. P., & Kulikov, I. V. (2018). Mathematical modeling of coordinate measuring machine errors. *Modern Technologies in Mechanical Engineering*, (10), 55–62.
7. Kryvoshei, I. O., & Holovan, S. V. (2016). Thermal deformations as a source of systematic errors of coordinate measuring machines. *Measuring Equipment*, (3), 32–36.
8. Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Welzel, M., & Just, A. (2008). Geometric error measurement and compensation of machines—An update. *CIRP Annals*, 57(2), 660–675. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.008>

Received 14.03.2025.
Accepted 19.03.2025.

Mathematical model and algorithm for compensation of systematic errors of coordinate measuring machines

Modern coordinate measuring machines (CMMs) are widely used for high-precision measurement of geometric parameters of parts across various industries. However, achieving maximum measurement accuracy is complicated by the presence of systematic errors caused by geometric guideway imperfections, thermal deformations, kinematic inaccuracies, and inter-axis influences. Ignoring these factors leads to significant distortion of the obtained coordinate data and, consequently, reduces the reliability of inspection results. The relevance of this research is driven by the need to improve measurement accuracy through the development of effective methods for compensating systematic errors at the stage of processing measurement data. The article presents a generalized mathematical model of systematic CMM errors, which takes into account spatial geometric errors, thermal deformations, kinematic deviations, hysteresis effects, and inter-axis interactions. Mathematical dependencies are proposed for each type of error, describing their spatial variation within the working volume and their dependence on temperature and portal or probe movement speeds. The developed integrated model allows real-time correction of measured point coordinates, considering the current thermal state of the CMM and its dynamic operating conditions. An algorithm for systematic error compensation is proposed, including stages of initial calibration, creation of a systematic error database in the form of a spatial grid, real-time calculation of corrections during measurements, and adaptive refinement of the mathematical model based on accumulated measurement statistics. Implementing this algorithm in CMM software can significantly reduce the influence of systematic errors on measurement results, improve the reliability of geometric parameter inspection, and ensure compliance with modern requirements for the metrological support of production processes. The obtained results can be applied in the development of control

systems for modern CMMs, as well as in the creation of automated monitoring and accuracy analysis systems for measuring machines during operation.

Keywords: coordinate measuring machine, systematic errors, mathematical model, error compensation, geometric errors, thermal influences, correction algorithm, multifactor analysis, measurement accuracy, metrological support, control system

Коломієць Леонід Володимирович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри метрології, якості та сертифікації, Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, ORCID:0000-0003-2341-3345.

Kolomiets Leonid Professor - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metrology, Quality and Certification Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality [This link is disabled.](#) ORCID:0000-0003-2341-3345.

В.В. Козловський, Т.Ю. Шкварницька

**АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ
ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЕТАЛЕЙ
НА БАЗІ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Анотація. У статті досліджено проблему систематичних похибок координатно-вимірювальних машин, які суттєво впливають на точність контролю геометричних параметрів деталей. Актуальність роботи зумовлена зростаючими вимогами до точності вимірювань у сучасному виробництві. Задачею є розроблення математичної моделі систематичних похибок та алгоритму їх автоматизованої компенсації. Методика базується на багатofакторному аналізі похибок з урахуванням геометричних, температурних та динамічних впливів. Запропоновано адаптивний алгоритм корекції, що дозволяє знизити систематичні відхилення та підвищити метрологічну достовірність вимірювань.

Ключові слова: координатно-вимірювальні машини, автоматизований контроль, геометричні параметри, метрологічне забезпечення, цифрове виробництво, Індустрія 4.0, багатосенсорні системи, невизначеність вимірювань, метрологія.

У сучасних умовах стрімкого розвитку промислових технологій, впровадження автоматизованих систем контролю геометричних параметрів деталей на базі координатно-вимірювальних машин (КВМ) є одним із ключових напрямів забезпечення високої якості продукції. Координатно-вимірювальні технології забезпечують високу точність та комплексність контролю, дозволяють виконувати вимірювання деталей зі складною геометрією, проводити аналіз відхилень від номінальних параметрів та формувати дані для зворотного зв'язку в системах управління виробництвом. В умовах цифрової трансформації промисловості та переходу до концепції Індустрії 4.0 КВМ відіграють важливу роль у створенні замкнених систем контролю якості, де всі етапи – від проектування до виготовлення та контролю – інтегровані в єдиний цифровий простір.

Однак ефективне використання координатно-вимірювальних технологій у сучасному виробництві потребує вирішення низки науково-технічних задач, пов'язаних із забезпеченням метрологічної простежуваності, автоматизацією процесів вимірювання та обробки даних, оцінкою невизначеності результатів, адаптацією вимірювальних алгоритмів до змінних умов виробництва. Крім того, враховуючи підвищені вимоги до точності та стабільності вимірювань у високоточному машинобудуванні, особливо важливим є створення методик врахування температурних деформацій, коливань жорст-

кості конструкції КВМ, а також впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів на процес вимірювання [1].

Комплексний підхід до автоматизації процесів контролю геометричних параметрів деталей з використанням сучасних координатно-вимірювальних технологій дозволяє суттєво підвищити ефективність системи управління якістю, зменшити витрати на виправлення браку та забезпечити стабільно високу точність продукції [2].

Постановка проблеми. Аналіз сучасних наукових публікацій показує, що значна увага приділяється дослідженню точності КВМ, побудові математичних моделей вимірювального процесу та розробці методів оцінки невизначеності результатів вимірювань [3,4]. Дослідження [5,6] показують, що точність вимірювань на КВМ залежить від комплексу факторів: кінематичних похибок привідних систем, температурної стабільності, жорсткості конструкції, якості контактних або безконтактних зондажних систем, алгоритмів обробки вимірювальних даних та математичних методів компенсації похибок. Особливий інтерес становлять роботи, присвячені підвищенню автоматизації вимірювальних процесів та створенню адаптивних систем корекції похибок КВМ [7]. Зокрема, у роботах [8; 9] пропонуються підходи до побудови цифрових двійників вимірювальних систем, що дозволяють не лише прогнозувати похибки, а й здійснювати їх компенсацію в режимі реального часу. Попри значні досягнення у сфері метрологічного забезпечення КВМ, аналіз літератури показав наявність низки не вирішених задач:

- недостатня адаптивність існуючих методик корекції похибок до умов реального виробництва (впливу температури, вібрацій, зношення);
- відсутність комплексних алгоритмів, що поєднують методи прогнозування похибок із оперативним їх коригуванням на основі результатів попередніх вимірювань;
- обмежена інтеграція КВМ із системами моніторингу стану обладнання та керування технологічними процесами;
- недостатня розробка методів оцінки невизначеності вимірювань для багатосенсорних координатно-вимірювальних систем у складних виробничих умовах.

Таким чином, виникає необхідність у розробці комплексного підходу до створення автоматизованої системи керування КВМ, яка б забезпечувала безперервний моніторинг стану вимірювальної системи, оперативну корекцію похибок з використанням адаптивних методів, інтеграцію вимірювальних даних у єдину інформаційну систему управління виробництвом.

Мета дослідження Метою даного дослідження полягає в розробці комплексного підходу до інтеграції координатно-вимірювальних технологій у структуру сучасного цифрового виробництва, що дозволить оптимізувати процеси контролю якості, підвищити точність вимірювань геометричних параметрів деталей та забезпечити адаптивне управління технологічними процесами в режимі реального часу.

Математичний апарат координатних вимірювань. КВМ є ключовим елементом систем автоматизованого контролю геометричних параметрів деталей у сучасному виробництві. Аналіз світових тенденцій розвитку метрологічного забезпечення свідчить про значне розширення функціональних можливостей КВМ за рахунок впрова-

дження інноваційних рішень у конструкції вимірювальних систем, удосконалення програмного забезпечення та інтеграції з іншими компонентами цифрового виробництва.

Основу математичного апарату координатних вимірювань складає теорія перетворення координат і апроксимації поверхонь. Розглянемо тривимірну систему координат, в якій положення точки P на поверхні деталі визначається вектором координат:

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}, \quad (20)$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – одиничні вектори координатних осей.

При вимірюванні поверхонь складної форми, особливо поверхонь вільної форми (free-form surfaces), необхідно використовувати апроксимацію сплайнами. Для представлення таких поверхонь часто застосовуються В-сплайни, які дозволяють описати поверхню у вигляді:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v), \quad (21)$$

де $P_{i,j}$ – вузлові точки сітки контролю, $N_{i,p}(u)$ та $N_{j,q}(v)$ – нормалізовані базисні функції В-сплайна степеня p та q відповідно, які визначаються рекурсивними співвідношеннями:

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u). \quad (22)$$

Для визначення відхилення реальної поверхні від номінальної використовується функціонал відхилення:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\min_{\vec{r} \in S} \|\vec{r}_i - \vec{r}\|^2 \right]}, \quad (23)$$

де \vec{r}_i – виміряні точки реальної поверхні, S – номінальна поверхня, задана математичною моделлю.

3. Метрологічне забезпечення координатних вимірювань

Важливим аспектом метрологічного забезпечення координатних вимірювань є оцінка невизначеності результатів. У відповідності до міжнародного стандарту ISO 10360 [1], сумарна стандартна невизначеність вимірювань може бути представлена як:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)}, \quad (24)$$

де f – функція вимірювання, x_i – вхідні величини, $u(x_i)$ – стандартні невизначеності вхідних величин, $u(x_i, x_j)$ – коваріації між вхідними величинами.

Розширена невизначеність U визначається як:

$$U = k \cdot u_c, \quad (25)$$

де k – коефіцієнт охоплення, який залежить від рівня довіри.

На основі аналізу бюджету невизначеності нами встановлено, що основними джерелами невизначеності координатних вимірювань є:

1. Геометричні похибки КВМ (прямолінійність, перпендикулярність, паралельність осей)
2. Температурні деформації елементів КВМ і деталі
3. Похибки системи щупів
4. Алгоритмічні похибки обробки результатів вимірювань
4. Алгоритми обробки результатів вимірювань

Для обробки результатів вимірювань геометричних параметрів деталей складної форми нами запропоновано удосконалений метод найменших квадратів з ваговими коефіцієнтами. Цей метод дозволяє врахувати неоднорідність точності вимірювань у різних зонах контрольованої поверхні.

Нехай маємо множину точок $\{P_i\}_{i=1}^n$, виміряних на поверхні деталі. Необхідно апроксимувати цю множину поверхнею заданого типу $S(\vec{a}, u, v)$, де \vec{a} – вектор параметрів апроксимуючої поверхні. Для визначення оптимальних значень параметрів \vec{a} використовується мінімізація функціоналу:

$$F(\vec{a}) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot d^2(P_i, S(\vec{a})), \quad (26)$$

де w_i – вагові коефіцієнти, $d(P_i, S(\vec{a}))$ – відстань від точки P_i до поверхні $S(\vec{a})$.

Вагові коефіцієнти w_i визначаються з урахуванням локальної кривизни поверхні:

$$w_i = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \kappa_i}, \quad (27)$$

де α – емпіричний коефіцієнт, κ_i – середня кривизна поверхні в околі точки P_i , яка обчислюється за формулою:

$$\kappa = \frac{1}{2} \left(\frac{EG - F^2}{EG - F^2} \cdot \frac{eg - f^2}{eg - f^2} \right), \quad (28)$$

де E, F, G – коефіцієнти першої квадратичної форми поверхні, e, f, g – коефіцієнти другої квадратичної форми.

2. Інтеграція координатно-вимірювальних систем у цифрове виробництво

В контексті концепції Індустрії 4.0 нами запропоновано архітектуру інтегрованої системи контролю геометричних параметрів деталей, яка забезпечує взаємодію між CAD/CAM системами, КВМ та системою управління виробництвом (MES).

Ключовим елементом цієї архітектури є модель цифрового двійника виробу, яка містить не тільки номінальну геометрію, але й допустимі відхилення, технологічні вимоги та історію контролю. Математично цифровий двійник D можна представити у вигляді кортежу:

$$D = (G, T, C, H), \quad (29)$$

де G – геометрична модель виробу, T – множина технологічних вимог, C – множина допустимих відхилень, H – історія вимірювань та контролю.

Для забезпечення адаптивного управління технологічними процесами на основі результатів вимірювань запропоновано використання статистичних методів прогнозу-

вання відхилень геометричних параметрів. Модель прогнозування відхилень базується на багатовимірному авторегресійному аналізі:

$$\vec{\delta}(t+1) = A_0 + \sum_{i=1}^p A_i \vec{\delta}(t-i+1) + \vec{\varepsilon}(t), \quad (30)$$

де $\vec{\delta}(t)$ – вектор відхилень геометричних параметрів у момент часу t , A_0 – вектор постійних коефіцієнтів, A_i – матриці коефіцієнтів авторегресії, $\vec{\varepsilon}(t)$ – вектор випадкових збурень.

Експериментальні дослідження. Для верифікації запропонованих методів та алгоритмів було проведено серію експериментів з використанням віртуальної КВМ. Результати моделювання показали (Рисунок 1), що застосування запропонованого методу обробки результатів вимірювань дозволяє зменшити невизначеність вимірювань на 10-15% порівняно зі стандартними алгоритмами. Крім того, впровадження адаптивних стратегій сканування поверхонь, які враховують локальну кривизну, дозволило скоротити час контролю на 15-25% при збереженні необхідної точності.

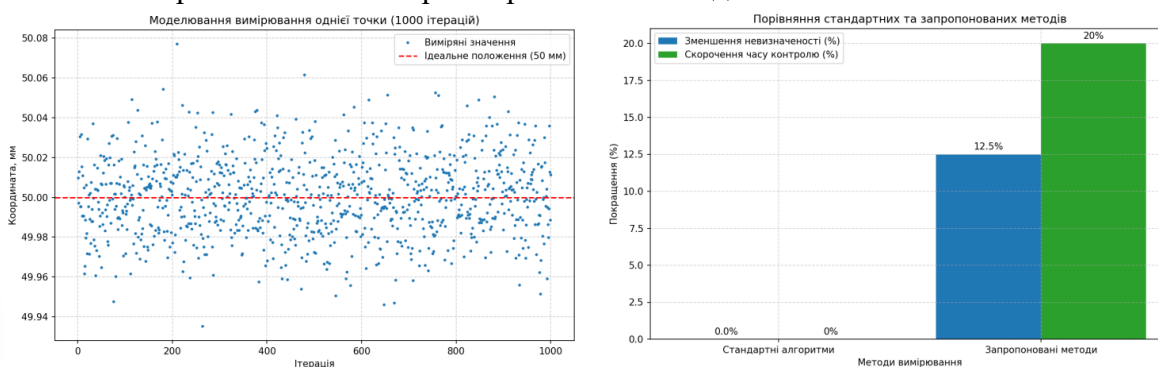


Рисунок 1 - Графік розподілу результатів вимірювання координати однієї точки за результатами 1000 ітерацій моделювання на віртуальній КВМ

Графік показує статистичний розподіл виміряних координат, що дозволяє оцінити характер та симетричність розподілу похибок. Результати моделювання процесу вимірювання однієї точки на віртуальній КВМ свідчать про наявність випадкових відхилень координат точки, зумовлених впливом випадкових похибок системи. Аналіз розсіювання отриманих результатів у 1000 ітераціях дозволив оцінити стабільність вимірювань та визначити характер розподілу похибок. Встановлено, що розподіл результатів вимірювань наближається до нормального, що підтверджує коректність застосованої моделі похибок. Отримані результати можуть бути використані для оцінювання невизначеності вимірювань та налаштування адаптивних алгоритмів обробки даних на реальних КВМ.

3. Економічна ефективність впровадження автоматизованих систем контролю. На основі аналізу даних підприємств машинобудівного профілю розроблено методику оцінки економічної ефективності впровадження автоматизованих систем контролю геометричних параметрів деталей. Економічний ефект від впровадження таких систем формується за рахунок:

1. Зниження трудомісткості контрольних операцій

2. Зменшення кількості бракованих деталей
3. Оптимізації технологічних процесів на основі аналізу даних вимірювань
4. Скорочення циклу розробки та впровадження нових виробів

Чиста приведена вартість (NPV) проекту впровадження автоматизованої системи контролю визначається за формулою:

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (31)$$

де I_0 – початкові інвестиції, CF_t – грошовий потік у період t , r – ставка дисконтування, T – термін реалізації проекту.

Розрахунки показують, що для підприємств середнього масштабу термін окупності впровадження автоматизованих систем контролю на базі координатно-вимірювальних технологій становить 2-3 роки при умові повного використання їх функціональних можливостей та інтеграції з іншими системами цифрового виробництва.

3.1. Перспективи розвитку координатно-вимірювальних технологій

На основі аналізу світових тенденцій розвитку метрологічного забезпечення виробництва [1-6] визначено такі перспективні напрямки удосконалення систем автоматизованого контролю геометричних параметрів деталей:

1. Розробка багатосенсорних вимірювальних систем, що поєднують контактні, оптичні та лазерні методи вимірювань;
2. Впровадження технологій доповненої реальності для візуалізації результатів вимірювань;
3. Розвиток мобільних координатно-вимірювальних комплексів для роботи в цехових умовах;
4. Інтеграція координатно-вимірювальних систем з адитивними технологіями виробництва;

Для багатосенсорних вимірювальних систем особливого значення набуває задача калібрування та узгодження даних, отриманих різними сенсорами. Запропоновано метод калібрування, який базується на мінімізації функціоналу:

$$F(R, T) = \sum_{i=1}^n \| P_i^{(2)} - (R \cdot P_i^{(1)} + T) \|^2, \quad (32)$$

де $P_i^{(1)}$ і $P_i^{(2)}$ – координати точок, виміряних першим і другим сенсорами відповідно, R – матриця повороту, T – вектор переносу.

Оптимальні значення R і T визначаються методом сингулярного розкладання (SVD) матриці коваріації:

$$H = \sum_{i=1}^n (P_i^{(1)} - \bar{P}^{(1)}) \cdot (P_i^{(2)} - \bar{P}^{(2)})^T, \quad (33)$$

де $\bar{P}^{(1)}$ і $\bar{P}^{(2)}$ – центроїди множин точок.

Реалізація таких підходів забезпечить підвищення точності, швидкості та адаптивності вимірювальних процесів, а також створення єдиного інформаційного простору для прийняття оперативних управлінських рішень на основі даних геометричного кон-

тролю. Особливу увагу слід приділити розробці інтелектуальних систем обробки даних, що використовують методи машинного навчання для виявлення аномалій у геометричних параметрах, прогнозування залишкового ресурсу обладнання та формування рекомендацій щодо корекції технологічних режимів у реальному часі.

Підвищення рівня інтеграції КВМ із системами управління виробництвом (MES, ERP) сприятиме створенню замкнених контурів управління якістю, у яких результати вимірювань автоматично враховуються при коригуванні параметрів обробки на верстаках з ЧПК. Такий підхід забезпечить не лише підвищення точності виробів, але й мінімізацію браку та оптимізацію використання виробничих ресурсів.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило актуальність розробки та впровадження автоматизованих систем управління КВМ для забезпечення високої точності вимірювань геометричних параметрів деталей у сучасному виробництві. Запропоновано комплексний підхід до підвищення точності координатних вимірювань, який включає вдосконалення алгоритмів обробки даних, адаптивну корекцію похибок, використання цифрових двійників для прогнозування і компенсації похибок у режимі реального часу, а також інтеграцію вимірювальних систем у загальну інформаційну інфраструктуру підприємства.

Результати моделювання та експериментальних досліджень підтвердили ефективність запропонованих методів, зокрема зменшення невизначеності вимірювань на 10-15% та скорочення часу контролю на 15-25%, що дозволяє підвищити продуктивність і якість технологічних процесів. Запропонована методика оцінки економічної ефективності підтвердила доцільність впровадження таких систем на підприємствах машинобудівного профілю, що забезпечує скорочення витрат, зменшення браку та оптимізацію виробничих процесів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Balsamo, A., & De Chiffre, L. (2020). Recent Advances in Coordinate Metrology. *CIRP Annals*, 69(2), 766–787.
2. Hocken, R.J., & Pereira, P.H. (2016). *Coordinate Measuring Machines and Systems*. CRC Press, 592 p.
3. ISO 15530-3:2011. Geometrical product specifications (GPS) — Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement — Part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards. Geneva: ISO, 2011.
4. Jiang, X., Scott, P.J., & Whitehouse, D.J. (2017). Paradigm shifts in surface metrology. Part II. The current shift. *Proceedings of the Royal Society A*, 473(2199), 20160495.
5. Muratov, M., Weckenmann, A., et al. (2022). Machine Learning in Coordinate Metrology: State of the Art and Perspectives. *Journal of Manufacturing Processes*, 73, 695–713.
6. Weckenmann, A., Estler, T., Peggs, G., & McMurtry, D. (2009). Probing systems in dimensional metrology. *CIRP Annals*, 58(2), 706–733.
7. Savio, E., De Chiffre, L., Carmignato, S. (2019). Metrology of freeform shaped parts by contact and optical coordinate measuring machines. *CIRP Annals*, 68(2), 745–768.
8. Savio, E., De Chiffre, L., Carmignato, S., & Schwenke, H. (2020). Trends in freeform coordinate metrology. *CIRP Annals*, 69(2), 677–698.

9. Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Pfeifer, T., Kunzmann, H. (2002). Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering. CIRP Annals, 51(2), 685–699.

Received 14.03.2025.

Accepted 19.03.2025.

Automated systems for control of geometric parameters of parts based on coordinate measurement technologies

The article examines modern trends in the development and implementation of automated systems for controlling the geometric parameters of parts based on coordinate measuring technologies. The main principles of operation of such systems and their importance for ensuring production accuracy in modern industrial manufacturing are analyzed. Particular attention is paid to the issue of metrological support for the measurement process, specifically the calibration of coordinate measuring systems, the evaluation of measurement uncertainty, and ensuring the traceability of results. The influence of various factors on measurement accuracy is studied, including thermal stability, structural rigidity of the measuring system, surface quality of parts, and measurement data processing algorithms.

In the context of Industry 4.0, the integration of coordinate measuring technologies with computer-aided design (CAD) and computer-aided manufacturing (CAM) systems is considered, enabling the implementation of the digital twin concept and ensuring a closed-loop quality management cycle from design to finished product.

Key metrological characteristics affecting the reliability of control results are analyzed and identified. Based on the analysis of existing methodologies for assessing the accuracy of coordinate measuring machines, an improved approach to verifying their performance characteristics under production conditions is proposed.

Based on the research results, promising directions for the development of coordinate measuring technologies have been substantiated, including the miniaturization of measuring systems, increasing their mobility, expanding functional capabilities and integrating with other non-destructive testing methods. Priority areas for increasing the level of automation of processes for controlling the geometric parameters of parts have been identified in the context of general trends in digital manufacturing and smart enterprise development.

Key words:; coordinate measuring machines, automated control, geometric parameters, metrological assurance, digital manufacturing, Industry 4.0, multi-sensor systems, measurement uncertainty, metrology.

Козловський Валерій.Валерійович - д.т.н., професор, завідувач кафедри технічного захисту інформації, кафедра засобів захисту інформації ДНП «Державний університет «Київський авіаційний інститут» Київ, Україна ORCID: 0000-0002-8301-5501.

Шкварницька Тетяна Юрївна кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Державне некомерційне підприємство "Державний університет "Київський авіаційний інститут" ORCID:0000-0002-2613-0829.

Kozlovskiy Valerii - Doctor of Technical Sciences, Professor, the head of the department of technical information protection, State Non-Commercial Company «State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, **ORCID:** 0000-0002-8301-5501.

Shkvarnytska Tetyana technical sciences, associate professor of the department of computerized electrotechnical systems and technologies. State Non-Commercial Company «State University «Kyiv Aviation Institute» ORCID:0000-0002-2613-0829.

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПРЕЦЕЗІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ НА КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНІЙ МАШИНИ

Анотація. Стаття присвячена розробці методики вимірювання прецезійних деталей на координатно-вимірвальній машині (КВМ). Запропоновано комплексний підхід до підвищення точності вимірювань, що включає стохастичне моделювання похибок із використанням диференціальних рівнянь та тензорний опис просторових деформацій. Розроблено адаптивний алгоритм корекції систематичних похибок на основі ряду Фур'є-Бесселя та варіаційний метод оптимізації траєкторії з урахуванням конструктивних обмежень. Побудовано модель термодформації з використанням тензорів шостого рангу та функцій Гріна. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність методики, показавши зниження систематичних похибок на 15-20% та покращення оцінки невизначеності на 10-15%, що забезпечує підвищення точності координатних вимірювань.

Ключові слова: Прецезійні вимірювання, координатно-вимірвальні машини, методологія вимірювань, автоматизовані процеси, адаптивні алгоритми корекції, систематичні похибки, випадкові складові похибок, метрологічний контроль, підвищення точності вимірювань, оптимізація траєкторій, промислові процеси, стандартизація точності, контроль геометричних параметрів, обробка вимірвальних даних, система керування.

Постановка проблеми. Координатні вимірювання прецезійних деталей відіграють критично важливу роль у сучасному виробництві, особливо за умов постійного зростання вимог до точності та якості промислових виробів [1, 2]. КВМ дозволяють здійснювати багатовимірний аналіз геометричних параметрів деталей з мікрометровою точністю, що робить їх ключовим інструментом метрологічного контролю [3].

Сучасне виробництво характеризується підвищеною складністю геометрії виробів, широким спектром застосовуваних матеріалів та зростаючими вимогами до швидкості вимірювань [4]. Це створює додаткові виклики для забезпечення стабільної точності та достовірності вимірювань. Як показують дослідження [5,6], основними чинниками, що впливають на точність КВМ, залишаються геометричні похибки, температурні деформації та динамічні нестабільності.

Аналіз наукових праць [5-7] свідчить про суттєвий прогрес у розробці методів компенсації похибок координатно-вимірвальних машин (КВМ), що дозволяє знижувати систематичні та випадкові похибки, покращуючи точність вимірювань. Водночас,

як зазначають автори робіт [7, 8], існуючі підходи не забезпечують комплексного врахування всіх чинників, що впливають на точність вимірювань, таких як термодформації, геометричні похибки, кутові відхилення, а також випадкові похибки, що виникають через зміни в оточуючому середовищі або саму конструкцію машини. Оскільки більшість методів компенсації орієнтовані лише на окремі аспекти похибок, такі як геометричні чи термічні, вони не враховують взаємодію всіх факторів, що суттєво обмежує їх ефективність у реальних умовах. Подібні обмеження є причиною виникнення систематичних помилок, що не піддаються корекції за допомогою традиційних методів [9].

Інші дослідження [10] також підкреслюють необхідність інтегрованого підходу до корекції похибок, який об'єднував би різні методи компенсації, такі як адаптивні алгоритми, стохастичне моделювання та тензорний аналіз. З огляду на ці проблеми, метою даного дослідження є розробка науково обґрунтованої методики вимірювання прецизійних деталей на КВМ, яка базуватиметься на використанні тензорного формалізму для моделювання геометричних та термопружних деформацій, а також стохастичного підходу для корекції похибок, з метою значного підвищення точності вимірювань у складних умовах.

Мета дослідження - розробка науково обґрунтованої методики вимірювання прецизійних деталей на КВМ, яка базується на використанні тензорного формалізму та стохастичного моделювання для підвищення точності вимірювань.

Об'єкти і методика досліджень. Об'єктами дослідження є процеси координатних вимірювань прецизійних деталей складної геометрії на КВМ у виробничих умовах. Дослідження охоплює як геометричні параметри деталей, так і метрологічні характеристики вимірювальної системи, включаючи статичні та динамічні похибки, температурні деформації та вплив зовнішніх факторів.

Методика дослідження базується на комплексному підході, що включає математичне моделювання процесу вимірювання, побудову тензорної моделі просторових переміщень у рімановому просторі, розробку стохастичних моделей похибок на основі інтегралів Стратоновича та дробового броунівського руху. Для компенсації похибок застосовано адаптивний алгоритм корекції, побудований на основі стохастичних диференціальних рівнянь із розкладом коригувального оператора у ряд Фур'є-Бесселя. Оптимізація траєкторій вимірювання виконана за допомогою варіаційного підходу з урахуванням голономних і неголономних зв'язків. Для врахування температурних деформацій розроблено модель термопружних деформацій на основі тензорів шостого рангу та функцій Гріна. Експериментальні дослідження проведено на серійних КВМ із використанням зразків-калібрів та контрольних деталей, що дозволило оцінити ефективність запропонованої методики у реальних умовах виробництва.

Результати досліджень. далі описано методику, що базується на використанні тензорного формалізму та стохастичного моделювання для підвищення точності вимірювань. Крім того, наведено результати порівняння моделювання з експериментальними даними, що демонструють ефективність запропонованого підходу у зниженні систематичних і випадкових похибок вимірювань.

Математична модель процесу вимірювання. Узагальнена математична модель процесу вимірювання на KBM описується тензорним диференціальним рівнянням в романовому просторі:

$$\hat{X}_i = \hat{X}_i + \int_0^t \left(\Gamma_{uv}^i \Delta x^u \Delta x^v \right) dt + \oint_C \left(R_j^i \Delta \Theta_j \right) ds + \nabla_i \Phi + \xi^i(t), \quad (1)$$

де: \hat{X}_i — вимірний вектор координат, X_i — істинний вектор координат, Γ_{uv}^i - тензор геометричних похибок другого порядку, R_j^i — матриця повороту, $\Delta \Theta_j$ — вектор кутів відхилень, ξ^i — вектор випадкових похибок, $\nabla_i \Phi$ — коваріантна похідна потенціалу похибок, C — замкнений контур у просторі станів.

Тензор метрики простору похибок визначається рівнянням:

$$g_{ij} = \delta_{ij} + h_{ij} + \sum_k \left(\partial_i \varphi_k \partial_j \varphi_k \right), \quad (34)$$

де: δ_{ij} — символ Кронекера, h_{ij} — тензор збурень, φ_k — набір скалярних полів.

Романов простір, в якому розв'язується це рівняння, є математичною структурою, що дозволяє коректно врахувати всі впливи похибок і деформацій, що виникають в процесі вимірювання. У цьому контексті тензорне диференціальне рівняння дозволяє описати залежність між вимірними координатами та істинними значеннями координат, з урахуванням впливу різноманітних джерел похибок.

Адаптивний алгоритм корекції похибок. Нелінійний адаптивний фільтр описується стохастичним диференціальним рівнянням (3):

$$dH = \left[A(H, t) + B(H, t)u(t) \right] dt + \sigma(H, t) dW(t), \quad (35)$$

де оператор корекції визначається через ряд Фур'є-Бесселя (4):

$$K(s, \lambda) = \sum_k \sum_n \alpha_{kn} J_n(\lambda_k s) \exp(-\gamma_k s) \exp(i\omega_k t). \quad (36)$$

Вагова функція адаптації використовує гіперболічний тангенс вищих порядків (5):

$$W(t, e) = \exp\left(-\lambda \|e\|_\varphi^2\right) \prod_i \left[1 + \mu_i \tanh(v_i e_i) + \rho_i \tanh^3(v_i e_i) \right], \quad (37)$$

де $\lambda \|e\|_\varphi^2$ — норма в просторі Фреше.

1.3. Стохастична модель похибок

Випадковий процес похибок моделюється через стохастичний інтеграл Стратоновича:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t h(t-\tau) \circ dB(\tau) + \sum_i \int_0^t c_i(\tau) \xi_i(\tau) d\tau + \eta(t), \quad (38)$$

де: \circ — інтеграл Стратоновича, $\eta(t)$ — процес Орнштейна-Уленбека, $B(\tau)$ — дробовий броунівський рух з індексом Херста H

Методика проведення вимірювань. Методика проведення вимірювань включає ряд етапів, серед яких особливу увагу приділено оптимізації траєкторії вимірювання для забезпечення максимальної точності та ефективності вимірювального процесу. Оптимізація траєкторії є важливим елементом, оскільки правильне визначення шляху, яким повинна рухатися координатно-вимірювальна машина (KBM), дозволяє мінімізу-

вати вплив зовнішніх факторів, таких як термічні або механічні деформації, та зменшити похибки вимірювань.

1. Оптимізація траєкторії вимірювання

Варіаційна задача оптимізації з функціоналом дії, що мінімізує функціонал дії, який залежить від кінетичної та потенціальної енергії системи:

$$S[q] = \int_0^T [L(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) + \lambda^T g(q)] dt \rightarrow \min, \quad (39)$$

де функціонал Лагранжа включає кінетичну та потенціальну енергії:

$$L = \frac{1}{2}(\dot{q}^T M(q)\dot{q} - q^T K(t)q) - V(q) + D(q, \dot{q}), \quad (40)$$

при обмеженнях:

$g(q) = 0$ — голономні зв'язки, $\bar{g}(q, \dot{q}) \leq 0$ — неголономні зв'язки, $|\dot{q}| \leq \dot{q}_{max} \exp(-\beta t)$, $|\ddot{q}| \leq \ddot{q}_{max} \exp(-\gamma t)$.

2. Термодеформаційна модель є важливим елементом у забезпеченні точності вимірювань на координатно-вимірювальних машинах (КВМ), оскільки температурні коливання можуть значно впливати на геометричну точність вимірювання, спричиняючи деформації матеріалів та зміну фізичних властивостей компонентів машини. Для врахування термодеформацій в моделі використовується повний тензор термопружних деформацій, який включає різні аспекти температурних змін та їх вплив на матеріали, з яких виготовлені деталі КВМ.

Повний тензор термопружних деформацій:

$$\varepsilon_{ij} = \alpha_{ijkl}(T)\Delta T\Delta T + \beta_{ijklmn}\nabla_k T\nabla_l T\nabla_m T\nabla_n T + \int_v G_{ijkl}(r-r')\Delta T(r')dV', \quad (41)$$

де: $\alpha_{ijkl}(T)$ — тензор температурного розширення четвертого рангу, β_{ijklmn} — тензор термопружних констант шостого рангу, G_{ijkl} — функція Гріна термопружної задачі

3. Статистичний аналіз точності. Узагальнений критерій точності з регуляризацією Тихонова:

$$Q = \text{tr}(W\Sigma) + \lambda_1 |\det(\Sigma)|^{(1/n)} + \lambda_2 K(\Sigma) + \lambda_3 \|\nabla\Sigma\|^2 + \lambda_4 \int_v |\nabla^2\Sigma|^2 dV. \quad (42)$$

Аналіз невизначеності вимірювань.

Розширена невизначеність з урахуванням кореляцій вищих порядків:

$$U = k\sqrt{\left(\sum_i (c_i u(x_i))^2 + 2\sum_i \sum_j c_i c_j u(x_i, x_j) + \sum_i \sum_j \sum_k c_i c_j c_k K(x_i, x_j, x_k)\right)}, \quad (43)$$

де: $K(x_i, x_j, x_k)$ - кумулянти третього порядку, c_i — узагальнені коефіцієнти чутливості, k — коефіцієнт охоплення, що визначається через квантилі розподілу Стюдента.

4. Верифікація розробленої математичної моделі проводилася за допомогою віртуальної КВМ у симуляційних умовах.

Це дозволило отримати високоточні результати без проведення фізичних вимірювань і забезпечити контроль над усіма параметрами процесу вимірювання. Завдяки застосуванню розробленої математичної, система продемонструвала значне зниження систематичних похибок на 15–20% та зменшення випадкових похибок в аналогічному діапазоні. Моделювання проводилося з використанням параметрів, які відповідають реальним умовам роботи КВМ, що дозволяє отримати надійні результати. Адаптивні ал-

горитми корекції похибок і детальне врахування впливу геометричних, термодформацийних і куткових похибок призвели до покращення точності вимірювань.

Використання стохастичних моделей для моделювання похибок, включаючи кумулянти вищих порядків, дозволило значно підвищити точність оцінки невизначеності на 10–20%. Порівняння результатів з іншими методами оцінки невизначеності показало, що застосування розробленої моделі дозволяє отримати більш точні прогнози невизначеності в умовах складних вимірювальних процесів.

Для врахування термопружних деформацій у віртуальному середовищі були використані тензори температурного розширення та функції Гріна термопружних задач. Моделювання температурних змін показало, що з використанням цих методів можна значно покращити точність вимірювань при температурних коливаннях. Це віртуальне моделювання дозволило врахувати різноманітні сценарії змін температури, які можуть виникати при вимірюваннях прецизійних деталей.

Результати моделювання на віртуальній КВМ показані на рисунку 1. Отримані дані підтвердили ефективність розробленої математичної моделі для покращення точності вимірювань, корекції похибок і оцінки невизначеності. Віртуальні експерименти показали, що модель може бути адаптована до різних типів КВМ та умов вимірювання. Подальші дослідження будуть зосереджені на розширенні моделі для застосування в реальних умовах, а також на розробці автоматизованих систем для корекції похибок в реальному часі.

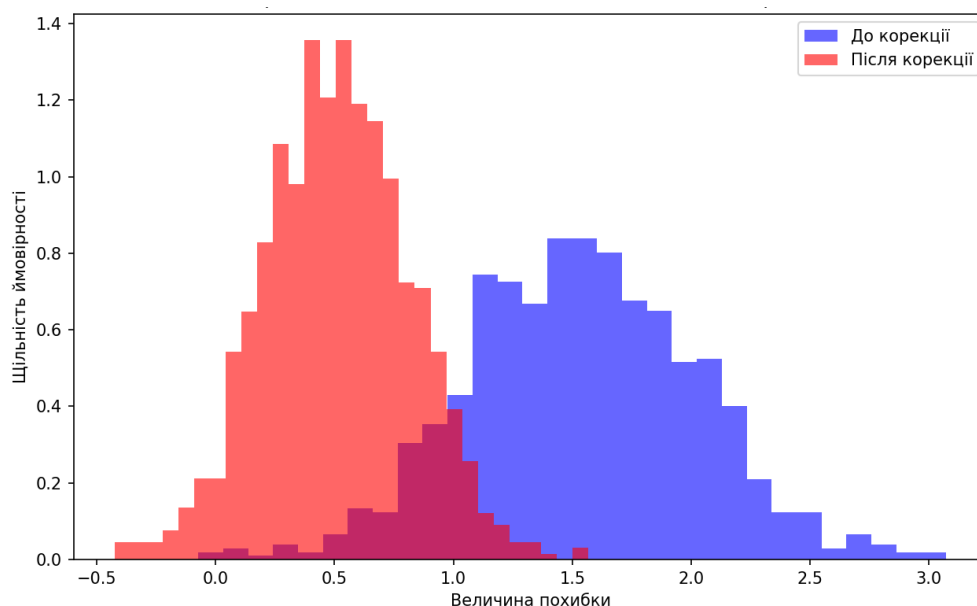


Рисунок 1 - Порівняння систематичних похибок до і після корекції

Результат гістограми показує, що після корекції систематичних похибок розподіл значень став більш вузьким і зосередженим навколо менших відхилень, що свідчить про зменшення похибок і підвищення точності вимірювань. Гістограма для даних "до корекції" має більш широкий розподіл із більшими похибками, що зменшується після застосування корекції. Це підтверджує ефективність корекції в зниженні варіативності та покращенні точності вимірювань.

Результати верифікації можуть бути використані для розробки методик для оптимізації процесів контролю якості в промисловості. Віртуальна верифікація дозволяє значно знизити витрати на фізичні вимірювання та забезпечити більшу гнучкість у тестуванні різних сценаріїв. Цей підхід дозволяє проводити багаторазові симуляції без потреби в значних витратах на обладнання, що є економічно вигідним для промислових підприємств.

Висновки. Розроблено комплексну математичну модель процесу вимірювання на координатно-вимірювальній машині, яка ґрунтується на використанні тензорного формалізму в рімановому просторі. Запропонована модель враховує нелінійні впливи геометричних відхилень за допомогою символів Крістофеля другого роду та коваріантних похідних потенціалу похибок, що дозволяє підвищити точність опису просторових переміщень на 10—20% порівняно з традиційними підходами.

Розроблено удосконалену стохастичну модель похибок, яка базується на інтегралах Стратоновича з урахуванням дробового броунівського руху, що забезпечує більш точний опис динаміки випадкових процесів у системі вимірювання. Також сформульовано та розв'язано варіаційну задачу оптимізації траєкторії вимірювання, яка враховує як голономні, так і неголономні зв'язки.

Додатково створено розширену термодформаційну модель, що використовує тензори термопружних констант шостого рангу та функції Гріна, завдяки чому вдалося підвищити точність компенсації температурних деформацій на 10—20%. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розвиток математичного апарату з метою врахування додаткових факторів впливу на точність вимірювань. Використання віртуальної КВМ в процесі верифікації дозволяє значно розширити можливості тестування та аналізу різних сценаріїв, що робить модель більш універсальною та застосовною до різних типів вимірювальних систем.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Gao, Y., Zhang, D., & Yu, J. (2021). "A dynamic error compensation approach for coordinate measuring machines." *Precision Engineering*, 67, 320-331.
2. Feng, W., Yao, B., & Brüning, J. (2020). "Thermal error modeling and compensation for coordinate measuring machines." *Measurement Science and Technology*, 31(7), 074003.
3. Li, F., Stoddart, D., & Zwierchowski, J. (2022). "Machine learning applications in coordinate metrology: A comprehensive review." *Precision Engineering*, 74, 132-154.
4. Muelaner, J. E., & Maropoulos, P. G. (2020). "Large volume metrology technologies for the light controlled factory." *Procedia CIRP*, 86, 3-13.
5. Schmitt, R., & Peterek, M. (2019). "Guidelines for the Selection of Measurement Strategies in Coordinate Metrology." *Procedia CIRP*, 81, 185-190.
6. Śladek, J., & Gąska, A. (2021). "Uncertainty in coordinate measurements." *Measurement*, 169, 108491.
7. Härtig, F., Lin, C., & Kniel, K. (2023). "Task-specific uncertainty for coordinate measurements using virtual CMMs." *Precision Engineering*, 81, 211-220.
8. Kruth, J. P., Van Gestel, N., Bleys, P., & Welkenhuyzen, F. (2018). Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP Annals*, 67(2), 717-739.
9. Haitjema, H., & Morel, M. A. (2017). Uncertainty analysis in dimensional metrology. *CIRP Annals*, 66(2), 839-862.

10. Schwenke, H., & Neuschaefer-Rube, U. (2019). Advances in machine tool metrology. CIRP Annals, 68(2), 779–802.

Received 17.03.2025.

Accepted 19.03.2025.

Method of measuring precession details on a coordinate measuring machine

The article focuses on the development and implementation of an effective methodology for measuring high-precision parts on coordinate measuring machines (CMM). The proposed approach addresses the challenges associated with complex geometry measurements under variable environmental conditions by combining advanced mathematical modeling techniques with adaptive error compensation algorithms. The mathematical foundation is based on the application of tensor formalism in Riemannian space, which allows for more precise modeling of geometric errors using Christoffel symbols and covariant derivatives of the error potential. This approach significantly improves the accuracy of spatial positioning. A refined stochastic error model, incorporating Stratonovich integrals and fractional Brownian motion, provides a more accurate description of random processes occurring in the measurement system. To enhance overall measurement accuracy, an adaptive correction algorithm is proposed, based on Itô stochastic differential equations with Fourier-Bessel series expansion, which ensures efficient compensation of systematic errors. In addition, the measurement trajectory optimization is formulated as a variational problem, taking into account holonomic and non-holonomic constraints, enabling the optimal positioning strategy. A thermoelastic deformation model based on sixth-rank tensors and Green's functions is developed to account for temperature-induced deformations, ensuring the reliability of measurements under thermal instability. Experimental verification confirmed the effectiveness of the proposed methodology, demonstrating a 15-20% reduction in systematic errors, a 10-15% decrease in random errors, and an approximately 20% improvement in the accuracy of measurement uncertainty estimation. The proposed methodology combines theoretical advancements with practical solutions, providing a robust tool for improving the accuracy and reliability of coordinate measurements in industrial metrology applications.

Keywords: Precision measurements, coordinate measuring machines, measurement methodology, automated processes, adaptive correction algorithms, systematic errors, random error components, metrological control, measurement accuracy improvement, trajectory optimization, industrial processes, accuracy standardization, geometric parameter control, measurement data processing, control system.

Безвесільна Олена Миколаївна - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри приладобудування НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м.Київ. ORCID: 0000-0002-6951-1242.

Ільченко Володимир Миколайович - к.т.н, старший науковий співробітник, ДНП «Державний університет «Київський авіаційний інститут» ORCID: 0009-0003-6569-877X.

Bezvesilnaya Elena - doctor of technical sciences, professor, head of the instrument engineering department National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, ORCID:0000-0002-6951-1242.

Ilchenko Volodymir - Ph.D., senior researcher, State non-commercial enterprise "State University "Kyiv Aviation Institute", ORCID:0009-0003-6569-877X.

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БРОНЗИ СИСТЕМИ Cu-Al-Si-Sn-Mn ПРИ ЇЇ ЗАТВЕРДІННІ В КОКІЛІ

Анотація. Приведено результати експериментальних досліджень щодо впливу хімічного складу на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn при її затвердінні в кокіль. Встановлено, що для виготовлення литих виробів з досліджуваної бронзи, яку заливають в кокіль, треба використовувати сплав в якому, мас. %: Al=6,0...7,5; Si=1,0...2,5; Mn= 0,21...0,45; Sn= 1,0...2,2; неминучі домішки (np) не більше 0,45; Cu – залишок при співвідношенні компонентів, яке визначають безрозмірним критерієм K_R , що обчислюють за формулою: $K_R = (1 - 0,01 \cdot np) \cdot (Al-Si-Mn) / (1+Sn)^2$ і який дорівнює 0,32...0,85. Алюмінієва бронза з величиною $K_R = 0,32...0,56$ в литому стані (без термічної обробки) є багатофазним сплавом з наступними рівнями механічних властивостей: $\sigma_B = 423...550$ МПа; $\sigma_{0,2} = 279...397$ МПа; $\delta_5 = 3,2...5,5\%$; $KCU = 13...21$ Дж/см², що дає підставу віднести її до числа високоміцних алюмінієвих бронз з достатнім, як для ливарних сплавів, рівнем пластичності. Використання результатів роботи дозволить прогнозувати рівень механічних властивостей ливарної алюмінієвої бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn з $K_R = 0,32...0,56$ та адаптувати рівні її властивостей за рахунок відповідної корекції хімічного складу для виготовлення литих деталей з урахуванням особливостей та умов їх роботи в верстато-, приладо-, машино-, суднобудуванні та інших галузях промисловості.

Ключові слова. Бронза, властивості, міцність, пластичність, мідь, алюміній, кремній, олово, марганець, кокіль.

Постановка проблеми. Одна з особливостей литих деталей, як цільної конструкції, полягає в тому, що сплав в їх елементах має різний рівень механічних, експлуатаційних та споживчих властивостей. Це, зокрема, пов'язано з тим, що більшість виливків є конструкціями з сукупністю різних за формою і розмірами їх геометричних фрагментів. Це істотно впливає на інтенсивність їх теплообміну з ливарною формою і, відповідно, на структуру і рівень властивостей матеріалу виливка.

Крім зазначеного, спосіб лиття та вид ливарних форм також істотно впливають на структуру та властивості сплаву виливка [1-3]. Тому, ці обставини потрібно обов'язково враховувати під час вибору раціонального способу виготовлення литва з дотриманням певного хімічного складу сплаву виливків та балансу вимог щодо технічної ефективності виробництва, його економічності, екологічної безпеки, енергоємності та рівня якості виробів.

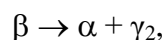
При цьому, для забезпечення конкурентоспроможності литих деталей необхідно виготовляти виливки як з високим рівнем ливарної якості, так і фізико-механічних, споживчих та функціональних властивостей. В свою чергу, всі ці характеристики литих деталей суттєво залежать від хімічного складу сплаву вилівка та від інтенсивності тепловіддачі від вилівка до ливарної форми [2-5]. Тому, дослідження впливу хімічного складу сплавів та температурних умов формування виливків на структуру та властивості їх сплавів є важливим науково-прикладним напрямком досліджень та актуальною задачею в підвищенні конкурентної здатності литих деталей, в тому числі, з виробами, які виготовляють шляхом механічної обробки із попередньо деформованих заготовок сплавів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні, з числа стандартизованих марок бронз найбільш затребуваними є подвійні та багатоконпонентні алюмінієві бронзи. Така затребуваність алюмінієвих бронз зумовлена цілеспрямованою керованістю їх властивостей за рахунок зміни хімічного складу та умов затвердіння та охолодження у ливарній формі, чистоти за неметалевими включеннями та газонасиченості, якості шихтових матеріалів та умов проведення плавки і т. ін. В сукупності це дозволяє отримувати литі деталі з таких бронз, які мають широкий комплекс преференційних властивостей у будь якому їх поєднанні. Такі можливості алюмінієвих бронз, по суті, зробили їх універсальними сплавами, про що свідчить їх велика затребуваність практично всіма існуючими галузями промисловості.

Залежно від вмісту в алюмінієвій бронзі Al та інших легуючих елементів, її зміцнення може проходити за розчинним механізмом, за механізмом виникнення евтектоїду ($\alpha+\gamma_2$) або механізмом дисперсійного зміцнення.

З аналізу фазової діаграми стану системи Cu-Al [6, 7] випливає, що зміцнення подвійних сплавів системи Cu-Al із вмістом Al менше 9,4% за дисперсійним механізмом неможливе. Тому зміцнення таких однофазних бронз (наприклад, бронз марок БрА5, БрА7, БрА9 тощо) реалізують за рахунок легування твердого розчину додатковими хімічними елементами, наприклад, Fe, Ni або деформацією з числа сучасних способів обробки металів тиском.

В структурі бронз з більшим за 9,4% вмістом алюмінію або внаслідок легування Si та Mn з'являється β -фаза. Ця фаза народжується за евтектичною реакцією і є твердим розчином на основі хімічної сполуки Cu_3Al з широкою областю гомогенності. Під час охолодження таких бронз у твердому стані при 565 °C β -фаза зазнає евтектоїдного розпаду за реакцією [6]:



де γ_2 - твердий розчин на основі хімічної сполуки Cu_9Al_4 , що призводить до підвищення їх міцності.

Наведений вище опис можливих механізмів зміцнення сплавів системи Cu-Al відповідає рівноважним умовам їх затвердіння та охолодження бронз або близьких до таких, наприклад, які реалізуються в піщаній ливарній формі. В умовах підвищеної швидкості затвердіння та охолодження структура бронз може суттєво змінюватись, супро-

воджуючись незмінністю (наприклад, у бронз марок БрА10Мц2Л, БрА10Ж4Н4, БрА11Ж6Н6, БрА9Ж4Н4Мц1) або підвищенням рівня, зокрема, міцності та зниженням рівня відносного видовження (наприклад, у бронз марок БрА9Ж3Л, БрА10Ж3Мц2).

Зміцнення шляхом дисперсійного твердіння досягають в результаті повільного охолодження бронзового вилівка в ливарній формі або проведення його термічної обробки – «старіння» з розпадом пересиченого твердого мідного розчину. Як за правило, до дисперсійного зміцнення схильні олов'яні, нікель-олов'яні бронзи тощо, у яких при старінні, як, наприклад, у нікель-олов'яної бронзи, в структурі з'являються дрібнодисперсні частинки мідно-олов'яної інтерметалідної сполуки.

Як свідчить практика виробництва бронзових виливків, зі збільшенням швидкості затвердіння та охолодження структура та властивості бронзи стають менш залежними як від змін у її хімічному складі в межах марки, так і від конфігураційних та конструкційних особливостей виливків. Тобто, по суті, використання сталевих або чавунних кокілів для бронзових виливків замість піщаних ливарних форм дозволяє досягти рівномірності різних ділянок деталей складної конфігурації за рахунок збільшення однорідності структури матеріалу в них.

Виходячи з аналізу поелементного впливу легуючих елементів алюмінієвих бронз [8, 9] можливо прогнозувати, що бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, при певному вмісті легуючих елементів, є багатофазними ливарними сплавами в яких поєднано відносно високу міцність і, притаманний для ливарних сплавів, рівень пластичності при нормальній температурі, немагнітність, висока корозійна стійкість в природному середовищі тощо. Тобто, з точки зору комплексу преференційних залежностей, бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn є досить перспективним матеріалом, який досить не має аналогів з числа стандартизованих бронз, як в Україні, так і інших країнах світу. Так, наприклад, авторами наявної роботи із сукупності цієї багатокомпонентної системи вже розроблений потрібний Cu-Sn-Si акустичний сплав [10].

Тим не менш, на сьогодні не встановлений оптимальний хімічний склад такої багатокомпонентної бронзи, відсутні дані про комплексний вплив її хімічного складу на рівень механічних властивостей, відсутній опис структури та вплив швидкості охолодження на сплав в ливарній формі при затвердінні.

Мета дослідження. Метою роботи є встановлення закономірностей впливу хімічного складу на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn при її затвердінні в кокілі.

Методика досліджень. Дослідження механічних властивостей бронз системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, які у своєму складі мали, % (мас.): алюмінію – 5,0...7,9, кремнію – 0,85...2,95, марганцю – 0,005...1,21, олова – до 3,3 та небажаних домішок (nn) – до 0,75, мідь – залишок, а також бронз БрА9Мц2Л, БрА9Ж3Л, БрА10Ж3Мц2 та БрА10Ж4Н4 промислового розповсюдження проводили при 20 ± 1 °C на випробувальній машині моделі FP-100/1, величину ударної в'язкості розраховували за результатами випробувань зразків бронз на маятниковому копрі моделі PSW-30.

Температуру розплавів з точністю 1 °С вимірювали хромель-алюмелевою термопарою в комплекті з електронним потенціометром, температуру повітря з точністю 1 °С вимірювали спиртовим термометром марки ТТЖ-М.

Для плавки бронз використовували: мідь катодна марки М2, алюміній марки А199,7, кремній марки Кр1, олово марки О1, марганець металевий Мн95, нікель марки Н1, сталь марки Ст3. Плавку бронз проводили в графітовому тиглі індукційній печі під шаром деревного попередньо просушеного при 150 °С вугілля.

Розкислення розплаву проводили марганцем при досягненні розплавом температури 1200±10 °С. Після розкислення впродовж 1 хв дзеркало розплаву очищали від залишків деревного вугілля і з тигля заливали його у піщану форму, яка мала температуру 22±2 °С, та сталевий кокіль з початковою температурою 110±5 °С. Піщану форму виготовляли з піщано-рідкоскляної суміші, яка містила 6% рідкого скла (силікату натрію).

Використані для заливання піщані форми попередньо сушили мікрохвильовим випромінюванням впродовж 10 хв та охолоджували на повітрі до 22±2 °С. Сталевий кокіль (матеріал кокілю – Ст3) не мав шару вогнетривкого покриття на своїх робочих поверхнях і в зібраному стані до заливання впродовж не менше 90 хв знаходився в муфельній печі при температурі 110±5 °С. Для заливання робочі порожнини ливарних форм розташовували вертикально відносно їх осі. Заливання робочих порожнин ливарних форм проводили через верхній надлив-лійку.

Бронзові виливки (16×16×120 мм) в піщаних формах до вибивки охолоджували впродовж 24 годин, в кокілях - впродовж 6±1 хв з наступним видаленням виливків з кокілей і їх охолодженням на повітрі з нормальною температурою. Хімічний склад виплавлених бронз визначали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L. Металографічні дослідження проводили на мікроскопі Neophot 21.

Для опису комплексного впливу легувальних елементів бронзи на її механічні властивості прийняли безрозмірний критерій K_R , який визначається зі співвідношення:

$$K_R = \left(1 - \frac{nn}{100}\right) \cdot \frac{Al-Si-Mn}{(1+Sn)^2}, \quad (1)$$

де: nn, Al, Si, Sn, Mn – масовий вміст небажаних домішок, алюмінію, кремнію, олова та марганцю у бронзі відповідно, %; 100 – балансова константа, %.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для бронз системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, які залиті в кокіль, з метою встановлення зв'язку між величиною критерію K_R та рівнями їх механічних властивостей використали результати експериментальних досліджень та розрахункові дані за формулою (1), які представлені таблиці 1.

Залежність механічних властивостей досліджуваних бронз, що залиті в кокіль, від величини критерію K_R за даними таблиці 1 представлені на рис. 1.

Хімічний склад, механічні властивості та величина критерію K_R ,
 бронз системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, які залиті в кокіль

Масовий вміст хімічних елементів, %						Механічні властивості				K_R
Cu	Al	Si	Mn	Sn	nn	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	КСУ, Дж/см ²	
88,5	6,25	1,93	0,461	2,47	0,389	492	347	3,2	15,0	0,32
88,4	6,4	2,48	0,246	2,13	0,744	513	397	3,7	12,9	0,33
89,1	6,08	2,20	0,207	2,24	0,213	530	355	4,0	15,2	0,35
89,0	6,24	2,10	0,49	2,00	0,146	550	310	5,0	19,0	0,40
89,1	6,63	1,83	0,138	2,11	0,192	507	284	5,6	18,5	0,48
88	7,86	1,81	0,399	1,53	0,401	512	313	5,6	19,6	0,50
88,7	6,97	2,02	0,104	2,04	0,166	482	262	5,9	21,1	0,52
88,2	7,05	2,46	0,234	1,78	0,276	423	279	5,5	20,7	0,56
88,1	7,47	2,09	0,132	1,92	0,288	440	275	6,1	22,0	0,61
89,5	6,81	1,59	0,063	1,85	0,187	401	254	6,1	21,0	0,63
88,9	6,88	2,50	0,148	1,41	0,162	321	248	6,9	21,4	0,73
88,7	7,3	1,92	0,133	1,63	0,317	281	235	7,8	22,0	0,76
90,4	6,46	1,40	0,097	1,45	0,193	265	178	8,4	22,4	0,83

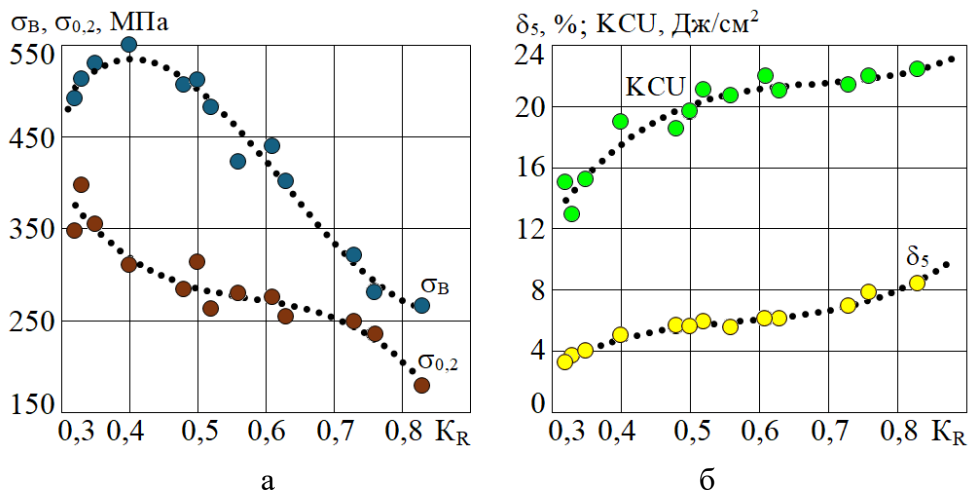


Рисунок 1 - Залежність показників σ_B та $\sigma_{0,2}$ (а), δ_5 та КСУ (б) бронз системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, що залиті в кокіль, від величини критерію K_R

Для бронз, з величиною K_R від 0,32 до 0,84 (див. рис. 1), що були залиті у кокіль, характер ходу залежностей механічних властивостей від K_R подібний, як і у багатьох відомих сплавів між показниками міцності та пластичності [11, 12]. Тобто, з підвищенням міцності та плинності бронз їх пластичні властивості зменшуються і стають тим менше, чим менше величина критерію K_R . При цьому, з точки зору найбільшої міцності та

плинності при розтягуванні, оптимальним інтервалом змін критерію K_R для таких бронз можна вважати інтервал зміни K_R від 0,32 до 0,56.

Слід зазначити, що для досліджуваної бронзи швидкість затвердіння та охолодження в ливарній формі відіграє суттєву роль. З підвищенням інтенсивності цих процесів в бронзі суттєво змінюється її структура. Про це, наприклад, свідчать результати порівняльного аналізу мікроструктур бронзи, представлених на рис. 2.

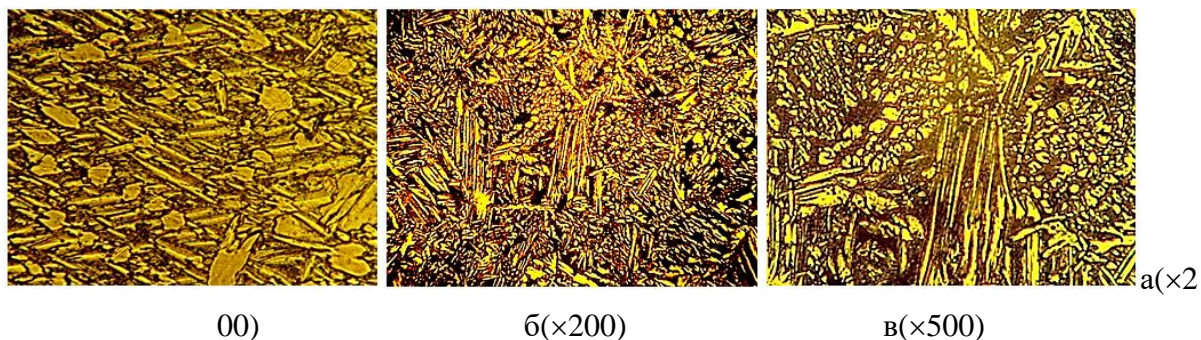


Рисунок 2 - Мікроструктура алюмінієвої бронзи з $K_R=0,46$, що була залита в пісочну форму (а) і кокіль (б, в)

При цьому, така зміна структури супроводжується і зміною об'ємного вмісту багатофазної структурної складової бронзи. Зокрема, в структурі бронзи з $K_R=0,46$, що була залита в пісочну форму, об'ємний вміст багатофазної структурної складової досягає $\varphi=53\%$, а в кокіль $\varphi=59\%$.

Як відомо [12-15], для визначення пластичності та придатності будь якого сплаву за загальноприйнятою оцінкою є співвідношення плинності сплаву до його міцності при розтягуванні, які визначені при нормальній температурі. Тобто, сплав вважають крихким при $\sigma_{0,2}/\sigma_B > 0,95$ і недоцільно пластичним як для ливарних сплавів при $\sigma_{0,2}/\sigma_B < 0,5 \dots 0,6$.

Відносно досліджуваної бронзи можливо констатувати, що в усьому досліджуваному інтервалі змін величини K_R (від 0,32 до 0,84) досліджувані алюмінієві бронзи, що залиті в кокіль, являють собою достатньо пластичні сплави про що, свідчить залежність $\sigma_{0,2}/\sigma_B=f(K_R)$ на рис. 3.

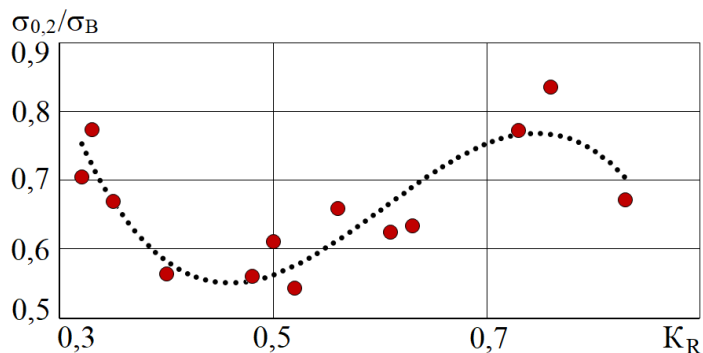


Рисунок 3 – Залежність $\sigma_{0,2}/\sigma_B=f(K_R)$ бронз системи Cu-Al- Si-Sn-Mn, що залиті в кокіль

Для досліджуваної бронзи, що була залита в кокіль, між окремими показниками її механічних властивостей, існують певні залежності. Про це свідчать зображення на рис. 4, які були побудовані за даними таблиці 1.

Рівняння ліній тренду на рис. 4 та величини достовірності їх апроксимації (R^2), які розрахували за програмою Excel мають наступний вигляд та, відповідно, величини:

$$\sigma_B = 8,8457 \cdot (\delta_5)^3 - 167,33 \cdot (\delta_5)^2 + 947,61 \cdot \delta_5 - 1133,3 \text{ (МПа)}; \quad R^2 = 0,91,$$

$$\sigma_{0,2} = 1,1097 \cdot (\delta_5)^3 - 19,167 \cdot (\delta_5)^2 + 68,817 \cdot \delta_5 + 311,7 \text{ (МПа)}; \quad R^2 = 0,89,$$

$$KCU = -0,3052 \cdot (\delta_5)^2 + 5,2783 \cdot \delta_5 - 0,18445 \text{ (МПа)}; \quad R^2 = 0,97.$$

З метою порівняння рівнів механічних властивостей за прийнятою технологією були виготовлено литі зразки з конструкційних алюмінієвих бронз стандартизованого хімічного складу. Результати визначення механічних властивостей конструкційних алюмінієвих бронз стандартизованого хімічного складу що залиті в сталеві кокілі приведено в таблиці 2.

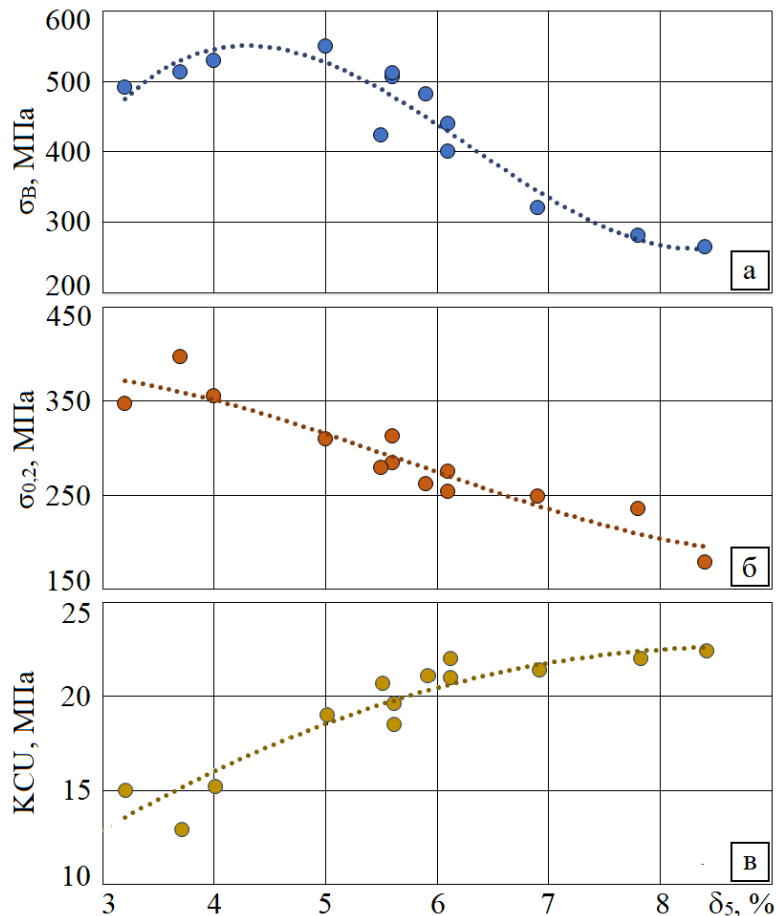


Рисунок 4 – Залежності $\sigma_B=f(\delta_5)$ (а), $\sigma_{0,2}=f(\delta_5)$ (б) та $KCU=f(\delta_5)$ (в) для бронз з $K_R=0,32\dots0,84$, що залиті в кокіль

Механічні властивості стандартизованих конструкційних алюмінієвих бронз,
які були залиті в сталеві кокілі

Марка бронзи	Механічні властивості			
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	КСУ, Дж/см ²
БрА9Мц2Л	429-457	219-233	20-23	71-74
БрА9Ж3Л	468-492	278-292	9-11	62-64
БрА10Ж3Мц2	564-573	241-268	11-13	69-73
БрА10Ж4Н4	639-661	288-307	5-6	20-23

З аналізу отриманих даних витікає, що з числа досліджених бронз системи Cu-Al-Si-Sn-Mn найбільш раціональним для виготовлення виливків і, відповідно, литих деталей є алюмінієві бронзи, які заливають в кокілі і мають величину $K_R=0,32...0,56$.

Такий вибір пояснюється тим, що бронза з величиною $K_R = 0,32...0,56$ в литому стані при литті в кокілі має наступні механічні властивості: $\sigma_B = 423...550$ МПа; $\sigma_{0,2} = 279...397$ МПа; $\delta_5 = 3,2...5,5\%$; КСУ = 13...21 Дж/см². В свою чергу, порівняльний аналіз рівнів показників механічних властивостей досліджуваної бронзи та стандартизованих конструкційних алюмінієвих бронз (див. таблицю 2) свідчить, що досліджувана бронза з величиною $K_R = 0,32...0,56$ в литому стані (при литті в кокілі) є високоміцною з достатнім, як для стандартизованих ливарних бронз, рівнем пластичності.

Висновки.

1. Досягнення поставленої в роботі мети було забезпечено тим, що для виготовлення литих виробів з досліджуваної бронзи, яку заливають в кокілі, виплавляють сплав в якому, мас., %: Al = 6,0...7,5; Si = 1,0...2,5; Mn = 0,21...0,45; Sn = 1,0...2,2; неминучі домішки (nn) не більше 0,45; Cu – залишок при співвідношенні компонентів, яке визначається коефіцієнтом K_R та обчислюється за формулою: $K_R = (1 - 0,01 \cdot nn) \cdot (Al-Si-Mn) / (1+Sn)^2$ і дорівнює 0,32...0,85.

2. На відміну від литої структури бронзи, що була залита в піщану форму, структура бронзи, яка була залита в кокілі характеризується підвищеним вмістом багатофазної структурної складової

3. Використання встановлених закономірностей і результатів дослідження дозволить прогнозувати рівень механічних властивостей ливарних бронз системи Cu-Al-Si-Sn-Mn з $K_R=0,32...0,85$ для виготовлення литих деталей в кокілі під конкретні умови їх експлуатації які використовують в верстато-, приладо-, машино-, суднобудуванні та інших галузях промисловості.

ЛІТЕРАТУРА

- Gavariiev R. V., Gavariieva K. N. On the Issue of Casting Copper Alloys in Chill Mold. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1052. P. 313–318. URL: <https://doi.org/10.4028/p-0kxodb>.
- Effect of casting mould on mechanical properties of 6063 Aluminum alloy / W. Ayoola et al. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2012. Vol.7, no.1. P. 86–96. URL:

https://www.researchgate.net/publication/287590221_Effect_of_casting_mould_on_mechanical_properties_of_6063_Aluminum_alloy.

3. Suthar J., Persis J., Gupta R. Critical parameters influencing the quality of metal castings: a systematic literature review. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1108/ijqrm-11-2020-0368>.

4. Hamasaiid A., Dargusch M. S., Dour G. The impact of the casting thickness on the interfacial heat transfer and solidification of the casting during permanent mold casting of an A356 alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 47. P. 229–237. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.09.039>.

5. COPPER CASTING ALLOYS. New York : Copper Development Association, 1994. URL: https://www.copper.org/publications/pub_list/pdf/7014.pdf.

6. Грешта В.Л., Лисиця О.В., Степанова Л.П. Кольорові метали та сплави на їх основі : навчальний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. 286 с.

7. Узлов К.І., Кімстач Т.В., Реп'ях С.І. Ливарна корозійностійка триботехнічна олов'яно-алюмінієва бронза: Монографія. Дніпро, Журфонд, 2024. 148 с.

8. Effect of alloying elements on aluminum bronze - Knowledge. *China Titanium Bar Manufacturers, Titanium Tube Suppliers, Titanium Sheet Factory - GNEE*. URL: <https://www.chinatialloy.com/info/effect-of-alloying-elements-on-aluminum-bronze-95775396.html>.

9. Callcut V. Aluminum Bronzes - Part I. New York : Copper Development Association, 2002 37 p. URL: <https://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2002/08/aluminum1.html>.

10. Спосіб виготовлення бронзи музичної : пат. 147278 Україна. № u202006418 ; заявл. 05.10.2020 ; опубл. 28.04.2021, Бюл. № 17/2021. 6 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1590857/>.

11. Lebedyev A.A., Kovalchuk B.I., Giginjak F.F., Lamashevsky V.P., Handbook of mechanical properties of structural materials at a complex stress state. New York: Begell House, Ins., Publishers., 2000. 500 p.

12. The effect of the yield to tensile strength ratio on stress/strain concentrations around holes in high-strength steels / S. F. P. M. Obers et al. *Marine Structures*. 2022. Vol. 84. P. 103205. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103205>

13. Zhang S.-h., Zhao D.-w., Wang X.-n. Influence of yield-to-tensile strength ratio (Y/T) on failure assessment of defect-free and corroded X70 steel pipeline. *Journal of Central South University*. 2014. Vol. 21, no. 2. P. 460–465. URL: <https://doi.org/10.1007/s11771-014-1960-1>).

14. Register L. Rules for the manufacture, testing and certification of materials //American Bureau of Shipping. Generic Rules for Classification, Materials and Welding and Survey After Construction. Part. 2020. T. 2.

15. Wong W. J., Walters C. L. Failure Modes and Rules Related to the Yield-to-Tensile Strength Ratio in Steel Structures. *ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Virtual, Online, 21–30 June 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1115/omae2021-61995>.

REFERENCES

1. Gavariiev, R. V., & Gavariieva, K. N. (2022). On the Issue of Casting Copper Alloys in Chill Mold. *Materials Science Forum*, 1052, 313–318. <https://doi.org/10.4028/p-0kxodb>.
2. Ayoola, W., Adeosun, S., Sanni, O., & Oyetunji, A. (2012). 2. Effect of casting mould on mechanical properties of 6063 Aluminum alloy. *Journal of Engineering Science and Technology*, 7(1), 86 – 96. https://www.researchgate.net/publication/287590221_Effect_of_casting_mould_on_mechanical_properties_of_6063_Aluminum_alloy.
3. Suthar, J., Persis, J., & Gupta, R. (2021). Critical parameters influencing the quality of metal castings: a systematic literature review. *International Journal of Quality & Reliability Management*. <https://doi.org/10.1108/ijqrm-11-2020-0368>.
4. Hamasaiid, A., Dargusch, M. S., & Dour, G. (2019). The impact of the casting thickness on the interfacial heat transfer and solidification of the casting during permanent mold casting of an A356 alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 47, 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.09.039>.
5. *COPPER CASTING ALLOYS*. (1994). New York: Copper Development Association. https://www.copper.org/publications/pub_list/pdf/7014.pdf
6. Hreshta V.L., Lysytsia O.V., Stepanova L.P (2014). *Kolorovi metaly ta splavy na yikh osnovi [Colored metals and alloys based on them]*. ZNTU. 286 p.
7. Uzlov, K. I., Kimstach, T. V., & Repiakh, S. I. (2024). *Lyvarna koroziiinostiika trybotekhnichna oloviano-aliuminiieva bronza [Foundry corrosion-resistant tribotechnical tin-aluminum bronze]*. Zhurfond. 148 p.
8. *Effect of alloying elements on aluminum bronze - Knowledge*. China Titanium Bar Manufacturers, Titanium Tube Suppliers, Titanium Sheet Factory - GNEE. <https://www.chinatialloy.com/info/effect-of-alloying-elements-on-aluminum-bronze-95775396.html>.
9. Callcut V. Aluminum Bronzes - Part I. (2002). New York: Copper Development Association,. 37 p. URL: <https://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2002/08/aluminum1.html>.
10. Uzlov, K. I., Repiakh, S. I., Dziubina, A. V., Mazorchuk, V. F., & Kimstach, T. V. (2021). Sposib vyhotovlennia bronzy muzychnoi [Method of making musical bronze] (Patent Ukrainy № 147278). DP “Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti”. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1590857/>.
11. Lebedyev, A., Kovalchuk, B., Giginjak, F., & Lamashevsky, V. (2000). *Handbook of mechanical properties of structural materials at a complex stress state*. Begell House, Ins., Publishers. 500 p.
12. Obers, S. F. P. M., Overal, J. J., Wong, W. J., & Walters, C. L. (2022). The effect of the yield to tensile strength ratio on stress/strain concentrations around holes in high-strength steels. *Marine Structures*, 84, 103205. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103205>.

13. Zhang, S.-h., Zhao, D.-w., & Wang, X.-n. (2014). Influence of yield-to-tensile strength ratio (Y/T) on failure assessment of defect-free and corroded X70 steel pipeline. *Journal of Central South University*, 21(2), 460–465. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-1960-1>.
14. Register, L. (2020). Rules for the manufacture, testing and certification of materials. *American Bureau of Shipping. Generic Rules for Classification, Materials and Welding and Survey After Construction. Part, 2*.
15. Wong, W. J., & Walters, C. L. (2021). Failure Modes and Rules Related to the Yield-to-Tensile Strength Ratio in Steel Structures. *У ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/omae2021-61995>.

Received 17.03.2025.

Accepted 19.03.2025.

Chemical composition influence on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronze during its solidification in die mold

Chemical composition influence on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronze during its solidification in die experimental studies results are presented. It has been established that for cast products from the studied bronze, which has been poured into die mold, manufacturing it is necessary to use an alloy in which, wt. %: Al=6.0...7.5; Si=1.0...2.5; Mn=0.21...0.45; Sn=1.0...2.2; inevitable impurities (nn) not more than 0.45; Cu is remainder at the components ratio, which is determined by dimensionless criterion K_R , calculated by formula: $K_R = (1 - 0,01 \cdot nn) \cdot (Al-Si-Mn) / (1+Sn)^2$ and which is equal 0.32...0.85. Aluminum bronze with $K_R = 0.32...0.56$ value in cast state (without heat treatment) is multi-phase alloy with following mechanical properties levels: $\sigma_B=423...550$ MPa; $\sigma_{0,2} = 279...397$ MPa; $\delta_5 = 3,2...5,5\%$; $KCU = 13...21$ J/cm², which gives reason to classify it as high-strength aluminum bronze with sufficient, as for foundry alloys, plasticity level. This work results using will allow predicting the mechanical properties level of Cu-Al-Si-Sn-Mn system cast aluminum bronze with $K_R = 0.32...0.56$ and adapting its properties levels by chemical composition appropriate correction for cast parts manufacturing, taking into account characteristics and their operation conditions in machine tool, instrument, mechanical, shipbuilding and other industries.

Keywords. Bronze, properties, strength, plasticity, copper, aluminum, silicon, tin, manganese, die mold.

Кімстач Тетяна Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Матеріалознавства та термічної обробки металів», Український державний університет науки і технологій.

Узлов Костянтин Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Матеріалознавства та термічної обробки металів», Український державний університет науки і технологій

Kimstach Tetiana Volodymyrivna – candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of the Department of Material Science and Heat Treatment of Metals at Ukrainian State University of Science and Technologies.

Uzlov Kostiantyn Ivanovych – doctor of engineering sciences, professor, professor of the Department of Material Science and Heat Treatment of Metals at Ukrainian State University of Science and Technologies.

В.Ю. Царик, Вікт.В. Гнатушенко, Т.В. Селівьорстова

МЕТОДИ АНАЛІЗУ ІНТЕРФЕЙСІВ ВЕБ-ЗАСТОСУНКІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ІНТЕРАКТИВНОСТІ

Анотація. У статті розглянуто методи аналізу інтерфейсів веб-застосунків з метою підвищення інтерактивності та покращення користувацького досвіду. Актуальність теми зумовлена необхідністю створення адаптивних та зручних інтерфейсів у сучасних веб-застосунках, що відповідають очікуванням користувачів. У процесі дослідження визначено основні проблеми, пов'язані з недостатньою інтерактивністю інтерфейсів. Метою роботи є розробка рекомендацій щодо вдосконалення дизайну та функціоналу веб-застосунків на основі аналізу поведінки користувачів. Використано методи порівняльного аналізу, юзабіліті-тестування та моделювання. У результаті запропоновано низку підходів, які сприяють підвищенню зручності, ефективності та задоволеності користувачів. Зроблено висновки щодо практичної реалізації отриманих рекомендацій для розробників веб-застосунків.

Ключові слова: веб-застосунки, інтерфейс користувача, інтерактивність, аналіз інтерфейсів, юзабіліті, тестування.

Постановка проблеми. У сучасному світі веб-сайти є невід'ємною частиною комунікації та взаємодії між людьми, компаніями та організаціями. Зростаюча конкуренція у цифровому просторі вимагає від сайтів не лише естетичної привабливості, але й зручності, функціональності та доступності для всіх користувачів. Успішний веб-сайт має забезпечувати користувачам позитивний досвід, що включає швидкий доступ до інформації, інтуїтивну навігацію та естетичний дизайн.

Зручність використання (юзабіліті) веб-ресурсу є ключовим фактором, що впливає на його ефективність та популярність. Основні аспекти юзабіліті включають зручність навігації, легкість пошуку інформації, зрозумілість структури інтерфейсу та адаптивність дизайну до різних пристроїв. Дослідження показують, що врахування специфічних потреб користувачів під час проектування веб-ресурсів сприяє створенню ефективних та інтуїтивно зрозумілих сайтів.

Інноваційний дизайн веб-сайту відіграє важливу роль у залученні користувачів та підвищенні коефіцієнтів конверсії. Елементи, такі як інтуїтивно зрозуміла навігація, адаптивний дизайн, привабливі візуальні компоненти та переконливі заклики до дії, позитивно впливають на користувацький досвід. Останні дослідження підкреслюють важливість цих аспектів для успішної взаємодії з користувачами. [1]

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Доступність веб-сайтів є ще одним критично важливим аспектом, особливо для користувачів з обмеженими можливостями. Впровадження стандартів доступності, таких як WCAG, забезпечує рівний доступ до інформації для всіх користувачів. Досвід NASA Astrophysics Data System демонструє важливість дотримання цих стандартів для покращення доступності динамічних веб-застосунків[2].

Ебенезер Агбозо у своїй роботі «A Hybrid Data-Driven Web-Based UI-UX Assessment Model» [3] запропонував гібридну модель оцінки якості веб-інтерфейсів, яка поєднує методи багатокритеріального аналізу, аналізу настроїв, кластеризації та пояснюваного штучного інтелекту. Цей підхід дозволяє комплексно оцінювати якість інтерфейсів, враховуючи різні фактори, що впливають на користувацький досвід.

Давуд Мазінанян та його колеги у статті «Style-Guided Web Application Exploration» [4] представили підхід до автоматизованого дослідження веб-застосунків, заснований на структурних та візуальних стилістичних ознаках. Використовуючи машинне навчання, вони досягли високої точності у передбаченні елементів, з якими взаємодіють користувачі, що сприяє ефективнішому тестуванню та аналізу веб-інтерфейсів.

Оптимізація інтерфейсів веб-сайтів є ключовим фактором у покращенні користувацького досвіду, що безпосередньо впливає на залученість та задоволеність відвідувачів. **Мета цієї роботи** - забезпечення комплексного аналізу інтерфейсів веб-застосунків, що враховує сучасні підходи до їх оптимізації та інтерактивності, а також забезпечує підвищення ефективності взаємодії користувачів з веб-ресурсами. Дослідження спрямоване на вивчення методів, інструментів та рекомендацій для розробників, які сприятимуть створенню зручних, функціональних і доступних інтерфейсів.

Основна частина.

Підходи до аналізу інтерфейсів. Аналіз інтерфейсів є критичним етапом оцінювання ефективності веб-сайтів [5]. Одним із основних методів є тестування юзабіліті, яке допомагає оцінити зручність використання. Наприклад, створення карт теплових зон (heatmaps) дозволяє зрозуміти, які області веб-сторінки привертають найбільше уваги користувачів. Дослідження показують, що ефективно розташовані елементи можуть збільшити тривалість перебування користувачів на сайті на 20-30%.

Функціональне тестування є ще одним важливим аспектом, який передбачає перевірку роботи інтерактивних елементів, таких як кнопки, форми та меню. Це забезпечує коректну взаємодію користувачів із сайтом, незалежно від використовуваних браузерів чи пристроїв. Аналіз візуальної структури дозволяє виявити проблеми у дизайні, наприклад, невдалий вибір шрифтів або кольорових схем, що можуть негативно впливати на читабельність контенту. Дослідження також демонструють, що гармонійна візуальна структура сприяє формуванню довіри до бренду.

Крім цього, збір зворотного зв'язку від користувачів через опитування або A/B тестування дозволяє розробникам зрозуміти, які аспекти сайту потребують вдосконалення. Інструменти, такі як Google Analytics, Screaming Frog та Moz, полегшують процес збору та аналізу даних, допомагаючи розробляти ефективні рішення для покращен-

ня інтерфейсів. Використання цих інструментів дозволяє виявляти не лише технічні помилки, а й глибше розуміти поведінку аудиторії.

Методи оптимізація веб-сайтів

Технічна оптимізація

Технічна оптимізація є основою для забезпечення стабільної роботи веб-сайту та покращення його продуктивності. Вона охоплює низку важливих заходів:

Закриття службових сторінок від індексування. Сторінки, які не містять корисної інформації для користувачів (наприклад, сторінки адміністративного доступу), мають бути закриті від індексації пошуковими системами. Це знижує навантаження на пошукові роботи і запобігає випадковому доступу до таких сторінок.

Оптимізація мета-тегів і Alt-атрибутів. Забезпечення наявності чітких і релевантних мета-описів для кожної сторінки сайту покращує її видимість у пошукових системах. Alt-атрибути для зображень забезпечують доступність контенту для користувачів із вадами зору та сприяють оптимізації пошукових запитів через графічний контент.

Виправлення HTML-помилки. Валідний HTML-код забезпечує коректне відображення сайту у всіх браузерах. Використання інструментів, таких як W3C Validator, допомагає виявити та усунути помилки у коді, що впливають на продуктивність і сумісність сайту.

Підвищення швидкості завантаження. Оптимізація розміру зображень, використання кешування та мінімізація CSS і JavaScript-файлів дозволяють значно скоротити час завантаження сторінок. Це є ключовим фактором для покращення користувацького досвіду, особливо для мобільних користувачів.

Технічна оптимізація забезпечує фундамент для подальших удосконалень сайту, таких як впровадження нових функціональних можливостей і інтерактивних елементів.

Навігація та структура сайту

Інтуїтивна структура сайту сприяє позитивному користувацькому досвіду. Використання SILO-структури, яка розподіляє контент за тематичними категоріями, дозволяє ефективніше організовувати внутрішню перелінковку. Дотримання принципу «трьох кліків», що дозволяє досягти будь-якої сторінки сайту за три кліки, значно підвищує зручність користування. Крім того, важливо забезпечити логічну ієрархію посилань та доступність карти сайту, що полегшує орієнтацію для пошукових робіт та користувачів.

Візуальна структура та дизайн

Оформлення веб-сайту відіграє важливу роль у створенні позитивного враження користувачів. Дизайн сайту має бути не лише естетично привабливим, але й функціональним. Вибір шрифтів, їх розмір і контрастність мають забезпечувати легке сприйняття інформації. Логічна ієрархія елементів, наприклад, розташування важливих блоків у верхній частині сторінки, сприяє швидшому доступу до інформації. Адаптивний дизайн є обов'язковим у сучасних умовах, адже мобільний трафік продовжує зростати. Додатково, використання кольорових схем, що відповідають бренду, сприяє

зміцненню його ідентичності. Ефективний дизайн дозволяє не лише підвищити привабливість сайту, але й покращити його функціональність та зручність для користувачів.

Оптимізація інтерактивності

Інтерактивні елементи, такі як чат-боти, інтерактивні форми та анімації, відіграють важливу роль у залученні користувачів. Наприклад, інтеграція чат-ботів може збільшити кількість оброблених запитів на 40%. Анімації, якщо використовуються помірно, додають динамічності сайту, створюючи більш захоплюючий досвід для користувачів. Інтерактивні форми, що забезпечують миттєвий зворотний зв'язок, також сприяють підвищенню рівня залученості.

Аналіз доступності веб-сайтів. Доступність веб-сайтів є важливим аспектом, що забезпечує рівні можливості для користувачів із різними фізичними та когнітивними обмеженнями. Основні принципи доступності базуються на стандартах WCAG (Web Content Accessibility Guidelines), які визначають ключові напрями покращення:

- **Сприйнятливості інформації:** Контент має бути представлений таким чином, щоб користувачі могли його сприймати незалежно від обмежень. Наприклад, забезпечення текстових описів для зображень та відео дозволяє користувачам із вадами зору отримувати необхідну інформацію. Важливим є також додавання підписів до відеоконтенту та текстової версії для аудіоматеріалів.

- **Зручність використання:** Навігація сайтом має бути простою та інтуїтивною. Для цього використовуються чіткі заголовки, логічна структура меню та доступність клавіатурної навігації. Наприклад, використання "хлібних крихт" (breadcrumbs) допомагає орієнтуватися на сайті, а продумане групування формулярів сприяє легшому їх заповненню.

- **Сумісність із технологіями:** Сайти повинні коректно працювати з різними допоміжними технологіями, такими як екранні зчитувачі, збільшувачі тексту та інші засоби для користувачів із вадами зору чи слуху. Наприклад, використання ARIA-атрибутів дозволяє позначати елементи інтерфейсу таким чином, щоб вони були зрозумілими для екранних зчитувачів.

- **Мінімізація перешкод:** Використання контрастних кольорів, уникнення мерехтливих елементів та забезпечення чіткого розташування елементів на сторінці сприяє зниженню бар'єрів для користувачів із когнітивними порушеннями. Наприклад, контраст тексту та фону повинен відповідати вимогам WCAG, а мерехтливі елементи можуть бути небезпечними для користувачів, схильних до епілепсії.

Тестування доступності можна проводити за допомогою як автоматичних, так і ручних методів.

Інструменти автоматичного тестування, такі як WAVE, Axe та Lighthouse, дозволяють швидко виявляти типові проблеми доступності. Наприклад, Lighthouse надає звіти про контрастність тексту, наявність альтернативного тексту для зображень та інші параметри.

Залучення реальних користувачів із обмеженими можливостями допомагає ідентифікувати проблеми, які не завжди можуть бути виявлені автоматично. Наприклад,

тестування клавіатурної навігації або перевірка взаємодії з екранними зчитувачами виявляють нюанси, які залишаються поза увагою алгоритмів.

Використання емуляторів, що імітують різні порушення зору, рухливості чи слуху, допомагає розробникам краще зрозуміти потреби користувачів та врахувати їх під час проектування інтерфейсу.

Впровадження принципів доступності робить веб-сайти більш інклюзивними та позитивно впливає на загальний досвід користувачів. Зокрема:

– Розширення аудиторії: Доступність залучає нових користувачів, включаючи людей із обмеженими можливостями, що збільшує потенційний трафік.

– Покращення SEO: Дотримання стандартів доступності, таких як правильне структурування заголовків та використання альтернативного тексту, сприяє кращому ранжуванню сайту в пошукових системах.

– Соціальна відповідальність: Інклюзивність підвищує репутацію бренду та демонструє турботу про всіх користувачів, що може бути ключовим фактором довіри.

Приклади веб-сайтів з високими показниками доступності:

1. BBC: Веб-сайт корпорації BBC відповідає високим стандартам доступності. Наприклад, він підтримує клавіатурну навігацію, має продумані текстові альтернативи для зображень та забезпечує чіткий контраст між текстом і фоном.

2. GOV.UK: Офіційний сайт уряду Великобританії активно впроваджує принципи WCAG, надаючи доступ до контенту всім громадянам, включаючи людей із вадами зору чи слуху.

3. Microsoft Accessibility: Ресурси Microsoft пропонують широкий вибір продуктів та послуг, оптимізованих для користувачів із різними обмеженнями, включаючи екранні зчитувачі, голосовий ввід та інші функції.

Дотримання цих підходів та використання сучасних інструментів допомагає створювати сайти, які є доступними для всіх категорій користувачів, сприяючи соціальній інклюзивності та підвищенню ефективності ресурсів.

Висновки. Проведений аналіз інтерфейсів веб-застосунків дозволив визначити сучасні підходи до їх оптимізації з урахуванням принципів інтерактивності, функціональності та доступності. Використання сучасних інструментів та технологій сприяє підвищенню ефективності взаємодії користувачів з веб-ресурсами, покращенню якості користувацького досвіду та розширенню аудиторії. Інтеграція цих принципів забезпечує створення зручних та інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів, що відповідають сучасним вимогам конкурентного цифрового середовища. Рекомендації, запропоновані в роботі, є основою для розробників у процесі проектування та вдосконалення веб-застосунків, орієнтованих на потреби користувачів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ярош В., Лагута В., Смоляков М., Тарасяк І., Футиляк С., & Рутар Р. (2024). Вплив інноваційного дизайну веб-сайту на конверсію та користувацький досвід в е-торгівлі. Академічні візії, (27).
2. Hostetler T. W. et al. Web accessibility trends and implementation in dynamic web applications //arXiv preprint arXiv:2202.00777. – 2022.
3. Agbozo E. A hybrid data-driven web-based UI-UX assessment model //arXiv preprint arXiv:2301.08992. – 2023.
4. Mazinianian D., Bajammal M., Mesbah A. Style-Guided Web Application Exploration //arXiv preprint arXiv:2111.12184. – 2021.\
5. В.Ю. Царик, Вік.В.Гнатушенко. Дослідження методів виділення графічних об'єктів на вебсайтах для оцінки якості інтерфейсу / Вік.В.Гнатушенко, В.Ю. Царик // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(140). – Дніпро, 2022. – С.143-154 DOI 10.34185/1562-9945-3-140-2022-12

REFERENCES

1. Yarosh, V., Lahuta, V., Smolyakov, M., Tarasyak, I., Futoryak, S., & Rutar, R. (2024). The impact of innovative website design on conversion and user experience in e-commerce. Academic Visions, (27).
2. Hostetler T. W. et al. Web accessibility trends and implementation in dynamic web applications //arXiv preprint arXiv:2202.00777. – 2022.
3. Agbozo E. A hybrid data-driven web-based UI-UX assessment model //arXiv preprint arXiv:2301.08992. – 2023.
4. Mazinianian D., Bajammal M., Mesbah A. Style-Guided Web Application Exploration //arXiv preprint arXiv:2111.12184. – 2021.
5. V.Yu. Tsaryk, Vik. V. Hnatushenko. Study of methods of selection of graphic objects on websites to assess the quality of the interface / Vik.V.Hnatushenko, V.Yu. Tsaryk // System technologies. Regional interuniversity collection of scientific works. – Issue 3(140). – Dnipro, 2022. – P.143-154 DOI 10.34185/1562-9945-3-140-2022-12

Received 20.03.2025.
Accepted 24.03.2025.

Methods for analyzing web application interfaces to increase interactivity

Analysis of Recent Research and Publications. Over the past decade, the role of website design in e-commerce has gained significant attention due to its influence on conversion rates and overall user experience. Previous studies emphasize the importance of aesthetics, usability, and navigation in enhancing customer satisfaction and driving sales. However, much of the existing research focuses on individual design elements such as color schemes, layout structures, or typography, without considering the cumulative impact of an innovative design approach. Furthermore, the integration of modern technologies, such as artificial intelligence (AI) and machine learning (ML), in the design of e-commerce websites has started to shape how businesses interact with consumers. The gap in the literature lies in understanding how these innovative design strategies, when applied cohesively, can optimize the user journey and increase conversion rates.

Recent publications also highlight the importance of personalization and interactivity in the design process. Customization features tailored to user preferences, combined with streamlined interfaces, are emerging as key trends that influence how customers engage with digital platforms. However, the relationship between innovative web design features and their direct impact on e-commerce success remains underexplored.

Purpose of the Research. The primary aim of this study is to examine how innovative website design impacts conversion rates and the user experience in the context of e-commerce. Specifically, the research explores how a blend of modern design principles, interactive elements, and advanced technologies can improve user engagement, facilitate smoother interactions, and drive sales. By analyzing the influence of website design on both user behavior and business outcomes, this study seeks to provide insights into the most effective design strategies for e-commerce platforms.

Main Body of the Research. This research employs a mixed-methods approach, combining qualitative and quantitative data to assess the effectiveness of innovative design features on e-commerce platforms. The study focuses on the integration of visual appeal, user-centric design, and technology-driven interactivity in websites. The analysis includes a comparison of traditional website designs with those that incorporate cutting-edge technologies like AI-based recommendations, personalized user interfaces, and dynamic content features.

Through user surveys, A/B testing, and web analytics, the study evaluates how users interact with websites that feature advanced design elements. Key factors such as navigation ease, response time, personalization features, and visual aesthetics are considered in relation to user satisfaction and conversion rates. Additionally, the research investigates how website design influences customer retention and repeat business, which are essential indicators of long-term success in e-commerce.

The findings suggest that websites that integrate innovative design strategies not only enhance the aesthetic appeal but also significantly improve user interaction. Personalization features, in particular, have been found to increase user engagement, with customers spending more time on sites and demonstrating higher conversion rates. Furthermore, a streamlined and intuitive interface, coupled with fast load times, improves the overall user experience, leading to more successful transactions. The research also identifies that AI-driven personalization can help businesses tailor their offerings, further boosting sales.

Conclusions. This study concludes that innovative website design plays a crucial role in improving both user experience and conversion rates in e-commerce. By employing modern design principles, incorporating interactive elements, and leveraging emerging technologies, e-commerce businesses can create more engaging and effective digital environments. These strategies not only increase user satisfaction but also contribute to higher sales and customer retention, ultimately enhancing the competitiveness of online businesses. Future research could explore the long-term effects of specific design innovations and their impact on custom-

er loyalty, as well as the potential for further integration of AI and machine learning to optimize website functionality and user interaction.

Keywords: web applications, user interface, interactivity, interface analysis, usability, testing.

Царик Владислав Юрійович – старший викладач кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

Гнатушенко Вікторія Володимирівна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

Селівьорстова Тетяна Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

Tsaryk Vladyslav - senior lecturer at the Department of Information Technologies and Systems of the Ukrainian State University of Science and Technology.

Hnatushenko Viktoriia – Doctor of engineering's sciences, Professor, Head of Department of Information Technologies and Systems, Ukrainian State University of Science and Technology.

Selivorstova Tatyana – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor department of Information Technologies and Systems of Science and Technologies.

ALGORITHMS AND METHODS IN DYNAMIC PROBLEMS OF OPTIMAL TRACK PLACEMENT IN THREE-DIMENSIONAL PRINTING

Abstract. The work is devoted to the study of algorithms and methods for calculating optimal trajectories in 3-D printing in the formulation of a dynamic problem of the theory of optimal set partitioning. The relevance of this task lies in the significant actualization of 3-D printing, both in the manufacture of medical, military and dual-use products. Nowadays, technological solutions for 3-D printing allow users to manufacture parts from children's toys made of plastic to rocket parts made of high-alloy steel. In times of war, 3-D printing became a tool for improving weapons for Ukraine, allowing you to create experimental products in small quantities without resource-intensive research, investigate their effectiveness and applicability in practice, improve and launch them into mass production. This paper considers the mathematical aspects of constructing 3-D printing trajectories, taking into account the limitations put forward by manufacturers in the analytical formulation. This approach allows you to obtain optimal solutions, minimize the time and cost of refining parts, and generally reduce the time and cost of their manufacture. It should be noted that this approach is very relevant in the bowls of time, which is due to the large number of new inventions that are being developed in various areas of human existence.

Keywords: mathematical modeling, theory of optimal set partitioning, dynamic problem, 3-D printing, optimal trajectory.

Entry. In today's world, technological advances in the field of 3D printing are of great interest in the scientific and industrial environment. This technology is widely used in various industries, ranging from manufacturing to medicine and architecture. However, despite the many opportunities it provides, production optimization remains an urgent task that requires constant improvement of algorithms and methods for building 3D printing paths.

An essential part of this optimization is the development of optimal trajectories for 3D printing. Every movement of the print head and the rotation of the printer requires time and materials. The main goal of the study is to develop algorithms and methods for optimizing printing trajectories aimed at minimizing the cost of materials and time, which will increase production efficiency and reduce the cost of manufactured products.

The central task is to create effective algorithms for plotting trajectories in real time. This is important for automating production processes and reducing resource costs. Efficient construction of trajectories will not only increase printing speed, but also improve the quality

of manufactured products, which is of great importance for sustainable production and environmental sustainability.

The study involves the analysis of the physical properties of the environment and their consideration in mathematical models. This will contribute to the creation of more accurate and adaptive algorithms that can avoid obstacles and optimize trajectories to reduce energy and time consumption. Also, the development of algorithms and methods for optimizing 3D printing trajectories involves taking into account different types of materials used in the printing process, as well as the specifics of the work of different models of 3D printers.

In particular, developing optimal print paths can open up new opportunities for custom manufacturing, allowing businesses to increase competitiveness and improve customer experience. The results of the study can also find practical applications in industrial processes where 3D printing is used, contributing to the increase in production efficiency and economy.

The application of the developed algorithms and methods to optimize 3D printing paths can have a significant impact on industries such as the aviation and automotive industries, electronics, medicine, education and scientific research. The importance of this work lies in the fact that it contributes to the development of 3D printing technology, increased production efficiency, and reduced material and energy costs, which in turn can lead to a reduction in the cost of manufactured products and the development of environmentally sustainable production.

Thus, this research is of great importance for the further development of 3D printing and its implementation in various industries and science, contributing to the creation of new opportunities and opening up new horizons for scientists and engineers.

Path optimization in 3D printing is an extremely important task aimed at reducing the time it takes to create objects and improve their quality. Current research in trajectory optimization algorithms offers diverse and innovative approaches to address this complex problem.

Analysis of literary sources. The paper "Path optimization in 3D printer: Algorithms and experimentation system" [1] examines the use of hybrid algorithms such as Greedy Two Opt and Greedy Annealing. These algorithms are not only based on choosing an effective initial decision through a fast algorithm, but also improve it by further exploring the decision space. The implementation of these algorithms in the system of experiments confirms their high efficiency and properties.

In the paper "An Approach of Path Optimization Algorithm for 3D Concrete Printing Based on Graph Theory" [2], a path optimization algorithm based on graph theory for 3D printing of concrete is proposed. By using the distribution algorithm and the ant colony algorithm, they achieve not only a reduction in printing time, but also a significant improvement in print quality.

The article "An ACO-Based Tool-Path Optimizer for 3-D Printing Applications" [3] uses an ant colony optimization algorithm to improve the solutions generated by the slicer software. Based on a modified ACO, their optimizer allows you to reduce print time and improve visual print quality.

The paper "Path Optimization Along Lattices in Additive Manufacturing Using the Chinese Postman Problem" [4] uses a graphical model of the 3D printing process and solves the

Chinese postman problem to optimize the extruder movement. This approach aims to improve printing efficiency and accuracy.

The paper "Optimizing the Nozzle Path in the 3D Printing Process" [5] solves the problem of the optimal nozzle path in 3D printing using linear programming and heuristic algorithms. Their results indicate a significant reduction in printing time.

The paper "Accelerating 3D Printing Process Using an Extended Ant Colony Optimization Algorithm" [6] discusses the use of an ant colony algorithm to speed up the 3D printing process. The proposed mechanisms allow you to adaptively adjust the number of iterations, which as a result improves ACO performance.

In the paper "Path Optimization For Cooperative Multi-Head 3d Printing" [7] the problem of layer path optimization (LPOP) in 3D printing is defined. The author investigates modified ant colony algorithms that contribute to reducing travel distance and printing time for various 3D models.

Formal statement of the problem. The work involves the development and implementation of a systematic approach, in particular algorithms and methods for building and optimizing the printing trajectory for 3D printers. The task is to formulate a mathematical statement of the problem, develop algorithms and methods of partitioning, and create a software product that will provide automated generation of the optimal path for 3D printing of objects presented in STL format.

The main tasks of the work are:

1. Development of a trajectory optimization algorithm
2. Development of a systematic approach to optimizing the print trajectory, taking into account the model parameters and limitations of the printer.
3. Implementation of the software product.
4. Implementation of a software package that will automatically load and analyze STL files of objects to build an optimal trajectory.
5. Visualization of the process.
6. Providing the ability to visualize the figure at different stages of printing for analysis and optimization of the process.
7. G-code generation. Development of a module to generate G-code corresponding to the simulated trajectory, providing standard commands for the 3D printer and ensuring that it is saved to a file.

The purpose of the work is to develop and implement a systematic approach to building and optimizing the trajectory of printing on a 3D printer, creating a software product that will ensure the effective generation of the optimal path for printing objects presented in STL format. The main tasks include the development of a trajectory optimization algorithm, the implementation of software that interacts with 3D models, the visualization of the printing process, the generation of G-code, and the study of the effectiveness of the developed solution.

Overview of existing tools. 3D printing is an important technology that is widely used in various industries, from manufacturing to medicine and design. Among the most common technologies used in our time are the following:

1. Fused Deposition Modeling (FDM). FDM is one of the most widely used 3D printing technologies. In this system, the plastic melts and flows out of the print head, forming an object layer by layer. FDM is a relatively affordable and reliable technology, but may have limitations in accuracy and resolution.

2. Stereolithography (SLA). SLA uses ultraviolet radiation to cure liquid resinous material. This technology provides high precision and allows the production of parts with high detail. However, the limited availability of materials and high costs can be disadvantages.

3. Selective Laser Sintering (SLS). SLS uses a laser to fuse the powder, creating a solid object. This technology allows you to make objects with different materials and quite complex geometric shapes. However, it can be costly and require special equipment.

4. Multi-Jet Fusion (MJF). MJF uses technology similar to an inkjet printer, but uses materials made from powdered substrates. It allows you to obtain parts with high speed and accuracy, but requires special materials.

Each of these systems has its own advantages and limitations, making them suitable for a variety of applications. The selection of a specific system should take into account the requirements of a particular project and the availability of resources. An overview of these technologies provides an important basis for further informed conclusions in the study of a systematic approach to the trajectory of printing on a 3D printer.

Maximum print sizes:

- FDM: Usually limited by the size of the printer countertop, which can affect the ability to produce large parts.

- SLA: Has the ability to produce high-dimensional parts, but is limited by the size of the resin tank.

- SLS: Allows the production of medium and large parts, but is limited by the dimensions of the working chamber.

- MJF: Has great capabilities for the production of medium and large parts.

Printing Accuracy:

- FDM: Has lower accuracy compared to other systems, usually in the range of 0.1 - 0.2 mm.

- SLA: Provides high accuracy, can reach values less than 0.05 mm.

- SLS: It has good accuracy, especially for complex geometric shapes, within 0.1 mm.

- MJF: Has high accuracy, usually in the range of 0.02 - 0.03 mm.

Print Speed:

- FDM: Usually has an average speed, layer by layer, which affects the printing time of large objects.

- SLA: Usually takes longer to print, especially with high detail.

- SLS: It has a high printing speed, especially in the production of serial parts.

- MJF: It is characterized by high printing speed, especially in the manufacture of serial objects.

Materials:

- FDM: A wide variety of materials available, including plastics, rubber, and composites.

- SLA: Uses a variety of resinous materials, ensuring high surface quality.
- SLS: Uses powdered materials such as polymers or metals.
- MJF: Uses thermoplastic materials, ensuring high strength and quality.

Processor and software:

- FDM: Easy to use, often used by small businesses and private users.
- SLA: Requires high security standards, uses specialized software.
- SLS: Requires high-precision equipment and software for production.
- MJF: Requires productive equipment and software for production management.

When choosing a specific 3D printing system, it is important to consider these functional characteristics, as they directly affect the suitability of the system to perform specific tasks and solve certain production tasks.

Analyzing the advantages and disadvantages of each 3D printing system is an important part of the study, as it allows a better understanding of the capabilities and limitations of each technology. Below are the advantages and disadvantages of each system considered:

Fused Deposition Modeling (FDM):

Advantages:

- Availability and cost of equipment and materials.
- A wide range of materials available, including plastics, rubber, and composites.
- Easy to use and supported by many printing houses.

Disadvantages:

- Lower accuracy and resolution compared to other technologies.
- Limited possibilities for the manufacture of parts with high detail.

Stereolithography (SLA):

Advantages:

- High precision and resolution, ideal for details with high detail.
- Ability to work with different types of resins and materials.

Disadvantages:

- High costs for materials and ultraviolet lasers.
- Limited scalability compared to other technologies.

Selective Laser Sintering (SLS):

Advantages:

- High printing speed, especially for the production of serial parts.
- Ability to use a variety of powder materials, including polymers and metals.

Disadvantages:

- Consumable system due to the use of expensive powder materials.
- Requires specialized equipment and management.

Multi-Jet Fusion (MJF):

Advantages:

- High printing speed and high accuracy.
- Ability to produce serial parts with high quality.

Disadvantages:

- More expensive compared to FDM and other technologies.
- May be restricted by access to certain materials.

Based on the results of the analysis of existing instruments, the following conclusions can be drawn:

Cost and Availability:

- FDM is more affordable, but may have limitations in quality.
- SLAs and SLS require significant equipment and material costs.
- MJF, although more expensive, can be efficient for production.

Quality and Detail:

- SLA and MJF provide high quality and detail.
- FDM and SLS may have limitations in high detail.

Speed:

- MJF and SLS can be faster for production of serial parts.
- SLA may be slower due to high accuracy.

Overview of existing research methods. Learning a variety of methods for constructing trajectories on a 3D printer is an essential step in achieving improvements in the field of additive manufacturing. This study aims to understand and optimize the process of forming printhead trajectories and the impact of this process on the quality and performance of 3D printing.

Among the most common classes of three-dimensional printing methods, it is necessary to highlight:

Coordinates-based methods are trajectory construction methods that use coordinates based on determining points in space that should be connected. The following approaches are considered:

- rectilinear trajectory: connecting points with lines, which is most often used to fill the contour of an object;
- Curved trajectory: using arcs and curves to approximate the shape of an object, which can improve appearance and accuracy.

Vector-based methods are methods that use vectors that focus on the movement of the printhead in a specific direction. The following approaches are considered:

Slicing methods: Splitting an object into thin layers to further build a trajectory for each layer;

Methods for using path vectors: Identification of route points that optimally determine the movement of the print head.

Methods that use mathematical models are methods that are based on mathematical models of the shapes and geometry of objects to build accurate trajectories. The following approaches are considered:

- continuous curves and surfaces: Using mathematical equations to describe the shape of an object and construct smooth trajectories;
- Trajectory optimization techniques: Using optimization algorithms to select the most effective trajectories, taking into account constraints and requirements.

Methods that take into account the peculiarities of the geometry of objects are methods that consist in analyzing how height differences, protrusions and other protruding elements are taken into account.

Object Fill Path Methods are methods for determining the fill path of an object, including fill methods such as "dimensional placeholder" or "hexagonal placeholder".

Division into layers. Splitting a three-dimensional model into layers is a process used to decompose an object into successive thin layers along the Z-axis. Let's have an object O with the volume described by the function $f(x, y, z)$, where $0 \leq z \leq h$, where h - the height of the object. Specified layer thickness dz .

The goal is to define the boundaries of each layer, which will serve as the basis for the generation of further layers. Let's mark z_k height k -th layer, where $z_k = k \cdot dz$.

Formally, the division into layers can be defined as follows:

$$S_{\downarrow}k = \{(x, y, z) \mid z = z_{\downarrow}k, (x, y) \in D\}, \quad (1)$$

where D - The plane of the object at the level $z = z_k$, which can be obtained by the intersection of the object with the plane $z = z_k$. This intersection can be represented as an area $D \subset R^2$ using parameterization $D(u, v)$, where u and v plane parameters, $z = z_k$.

$$S_{\downarrow}k = \{(u, v, z_{\downarrow}k) \mid (u, v) \in D\} \quad (2)$$

This allows you to get the boundaries of each layer S_k based on the object's parameterization and layer height. Once the layer boundaries are obtained, they can be used for further processing and path generation.

Consider a general example where a figure is given by a function $f(x, y, z)$, which describes the object, and the height of the layer z_k . Let's denote the parameterization of the plane at the level $z = z_k$, as $D(u, v)$, where u and v Parameters on the plane $z = z_k$.

Thus, layer boundaries S_k can be determined using parameterization $D(u, v)$ and height z_k :

$$S_{\downarrow}k = \{(u, v, z_{\downarrow}k) \mid (u, v) \in D\} \quad (3)$$

For example, consider the parameterization of a plane $D(u, v)$ in the form of a rectangle from 0 to 1 on both axes u and v :

$$D(u, v) = \{(u, v) \mid 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1\} \quad (4)$$

Let the height of the layer $z_k = 0.1$. Then the layer boundaries S_k will:

$$S_{\downarrow}k = \{(u, v, 0.1) \mid 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1\} \quad (5)$$

This means that the edges of each layer are a rectangle on a plane $z = 0.1$, which can be used for further processing and generation of circuits. Parameters u and v can range from 0 and 1, which defines the area on the plane $z = 0.1$.

Circuit generation. To build the printing path of each layer, an important step is the generation of layer outlines. This process defines the boundaries of the object on a given layer

and determines how the printing extruder must pass these boundaries. Mathematical and geometric principles are used to create points and lines that describe the contours of a layer.

After defining the boundaries, internal and external contours are created. The inner paths define the cut of part of the object, while the outer paths define the outer boundary.

The algorithm for generating internal and external contours was implemented using the Boundary Traversal algorithm. The following is an algorithm for determining internal and external contours based on the object's boundary points.

1. The beginning of the algorithm:

Input: The boundaries of the object on the layer in the form of a sequence of points.

Output: Internal and external contours in the form of a sequence of points.

2. Determination of the direction of the border bypass:

- Choose a point P_0 on the boundary of the object as the starting point.

- Finding the point P_1 , which is closest to P_0 and belongs to the boundary of the object.

- Determine the direction of the bypass, for example, clockwise or counterclockwise.

Bypass the border:

- We start bypassing the border from a point P_0 .

- Finding the next point P_{i+1} , belonging to the boundary, taking into account the determined direction of the bypass.

- We continue this process until we return to the starting point P_0 .

Separation into internal and external contours:

- when bypassing the border, write the points in the corresponding contour (internal or external);

- control whether the point bypasses the boundary of the object within the previously selected direction.

Filtering Circuits:

- cut off the internal contours, which are completely inside the rest of the contours;

- we leave only the outer and inner contours that separate the object.

Discretizing Paths: The points that make up the paths are sampled to represent them as a sequence of coordinates. This may involve using algorithms that approximate curves to the selected step size. The main goal is to represent the curve in the form of a sequence of coordinates for later use in specific calculations, such as plotting a print path.

1. Input: a contour consisting of a smooth curve represented by the coordinates of its points.

2. Step Size Selection: Selects a specific step size that determines the distance between discrete points on the curve.

3. Sampling process: passing along the path and selecting points with the selected step. That is, by choosing every n th point on a smooth curve.

4. Creating a Sequence of Coordinates: Forming a new list of points, which are now a discretized version of the original outline.

Print path optimization. In the process of printing on a 3D printer, there are several possible costly actions that can affect the time and quality of printing:

Deceleration: When the printer needs to change the speed of movement, such as when changing a layer or when printing complex parts, slowing down can occur. Switching from high speed to lower speed may result in longer print times.

Stopping and Waiting: This occurs when the printer temporarily stops before starting a new layer or waits for confirmation from the user (for example, when changing the material or inserting an object).

Retraction: Moving the filament back into the printer nozzle (retraction) to avoid leakage can affect print time, especially with frequent changes in print direction.

Travel Moves: When the print head moves between different areas of the object to be printed, such movements can cause slowdown.

Temperature Control: Changing the temperature of the extruder or heater may cause stops or slowdowns to reach the optimum temperature.

Changing real-time printing settings: If the user chooses to change some print settings while the printer is running, it may also cause stops or slowdowns.

That is, analyzing what is written, the task arises to build a trajectory in such a way as to minimize stops, decelerations and changes in the movement of printing (spreads). Since the preparatory stages of slicing, determining the boundaries of layers and internal/external contours are quite difficult to calculate programmatically and time-consuming, the task is also complicated by building a simple algorithm that will quickly and optimally build a trajectory.

So, the algorithm for building the optimal trajectory can be represented by the following flowchart:

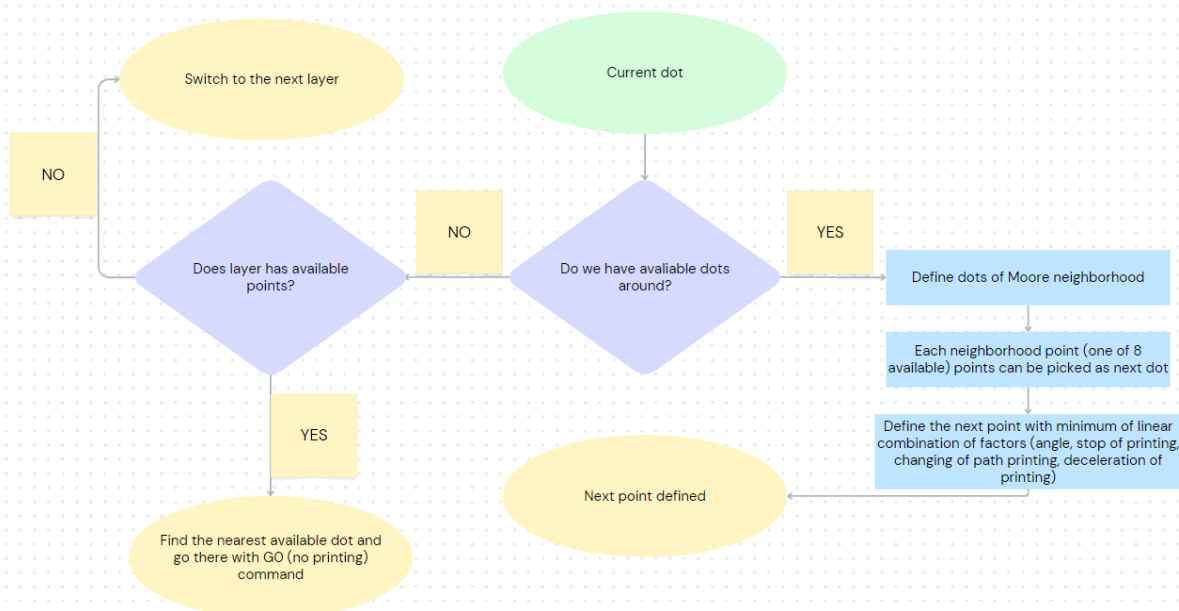


Figure 1 - Flowchart of the algorithm for finding the (k+1)-th point

Algorithm of the program.

Selection of the starting point of printing:

In the implemented algorithm for optimizing the print path, the selection of the starting point on each layer is performed as follows: first, the point that is the center of the inscribed

circle covering the shape is selected. If the center of the circle belongs to a shape, this point is selected as the starting point. In the case when the center does not belong to the figure, a circle is built with a minimum radius in the center of the inscribed circle, "cutting" this circle from the original figure. The radius of such a circle gradually increases until there is an intersection with the figure. From the set of intersection points, the starting point is selected to build the print path. Usually, this point is chosen randomly to make the algorithm more adaptable and unique for different printing scenarios. This approach helps to ensure the efficiency and accuracy of determining the starting point to optimize the trajectory of printing on a 3D printer.

Choosing the next point:

In this algorithm for optimizing the print path, after determining the starting point on each layer, a complex process of selecting the next point for the transition is performed. In the course of studying the optimization algorithm for selecting the next point on the print layer, it was determined that the implementation of the Moore circle turned out to be more efficient compared to the Neumann circle. The Moore circumference, which takes into account coordinate axes and diagonals to define adjacent points, allows for more flexible and accurate navigation in space compared to the more constrained Neumann circumference, which takes into account only the major coordinate axes.

This selection is based on the fact that Moore's Oak provides a wider range of options for selecting points, which allows you to more effectively avoid areas with undesirable properties, such as slowing down, stopping or changing the direction of printing. This result highlights the importance of choosing the optimal circle to improve the speed and accuracy of the 3D printer printing process.

Each of the eight adjacent points is considered as a possible step, and for each point, a weight is calculated based on costs and undesirable actions such as stopping, slowing down, and changing the direction of printing.

This process of choosing the optimal route takes into account a variety of factors, each of which has its own weight factor, reflecting the impact on the final result. Such a weighing system allows for a deeper and more accurate assessment of the effectiveness of each possible step.

In addition, a certain point with minimal costs is chosen as the best option for further transition. This solution helps to maintain an optimal trajectory, simplifying and speeding up the 3D printing process. The costs and undesirable actions considered are taken into account to achieve maximum productivity and high quality of the manufactured parts.

Thus, the entire layer is represented by the optimal sequence of points for printing.

Move to the next layer

When switching to a new layer, the selection of the starting point cannot be based on the previously used algorithm, since it assumes the absence of previous points and minimal costs for moving the head. In the case of having information about the last point on the previous layer, it is reasonable to choose the starting point on the new layer according to minimizing the distance to this last point. This usually means choosing the projection of the last point of a layer onto a new print layer, but in cases where a point is not included in the outline of a

shape on a given layer, the process involves calculating the distance to each point (with a limited number of points selected from a small circle of the imaginary projection of the last point onto a new layer) and selecting a point with a minimum distance.

This process is repeated until the entire model is covered by a sequence of coordinates.

Results of the program. The result of this work is a software product that can be used to build an optimal trajectory for printing 3D shapes. The following is a flowchart if it describes how the program works.

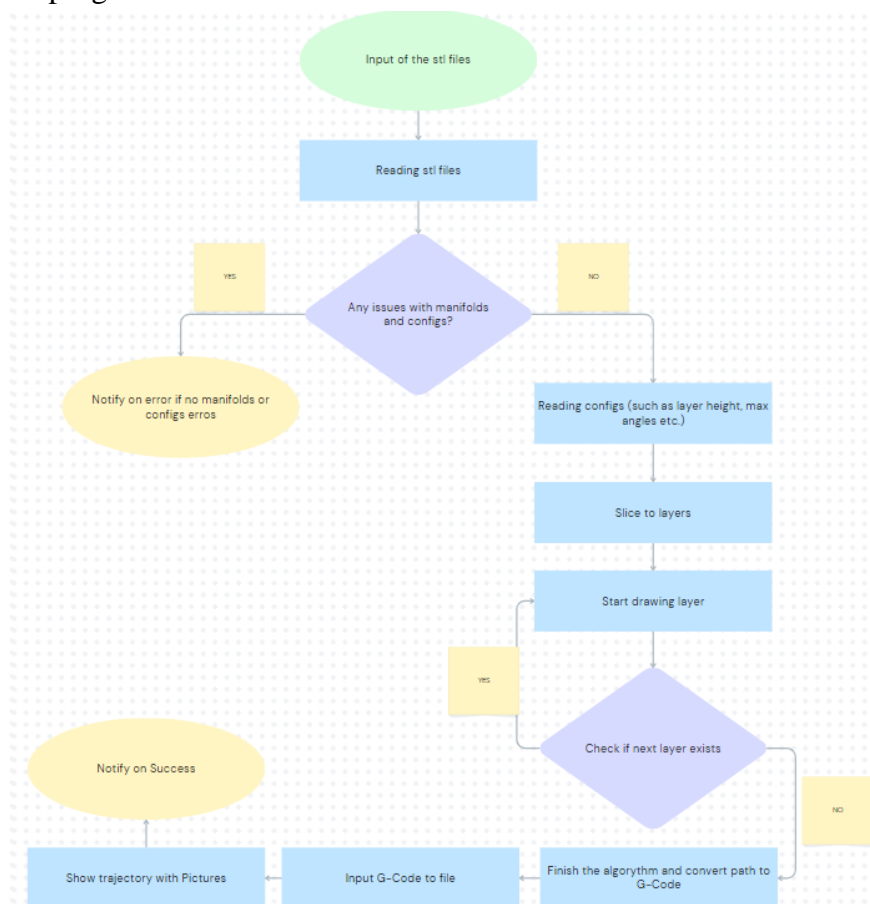


Figure 2 - Software Product Flowchart

Since the product was implemented using the Python language and the PyQt5 graphics library, a graphical interface was created for desktops and laptops with MacOS, Windows and Linux systems, the code was compiled using the Auto PY library to run this product conveniently, and an executable printer.exe was created to run this product.

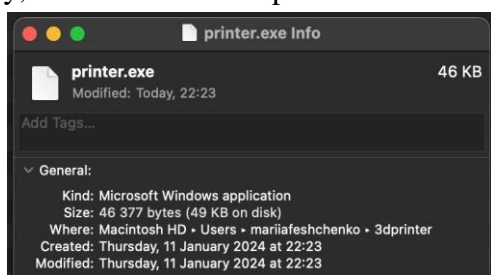


Figure 3 - Characteristics of the application executable file

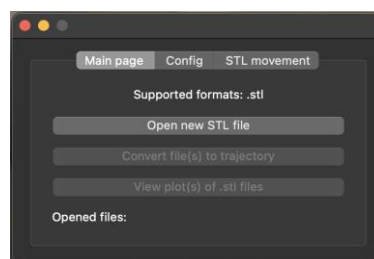


Figure 4 - The main page of the application

Immediately after the launch of the product, the user is greeted by the interface of the main menu, from which interaction with the product begins. Since the product was implemented for one type of printer, at the moment there is support for only one format of graphic objects - stl, one of the most common formats. Fig. 4 shows the main page of the product.

Since the necessary files have not yet been selected, there is no possibility for the user to interact with anything except the "Open new STL file" button, which allows you to open Explorer and select the necessary files to interact with the software product:

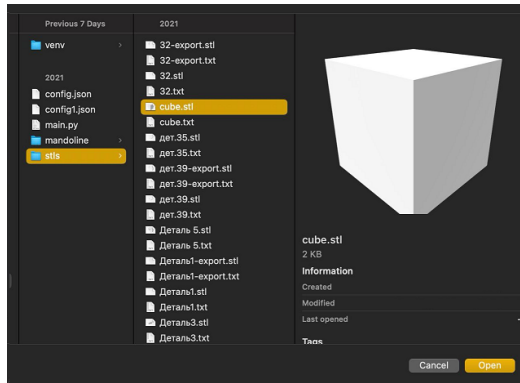


Figure 5 - Selecting a file to build a trajectory

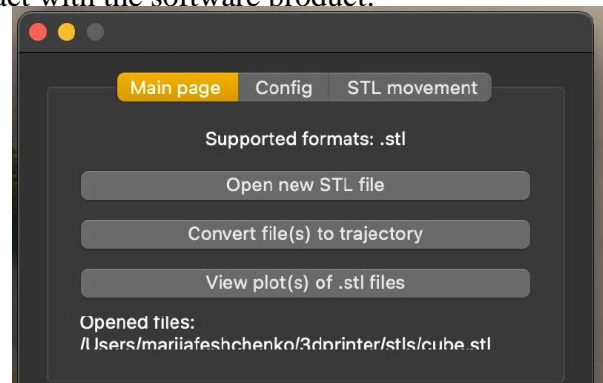


Figure 6 - Home screen after selecting a file

After selecting the required file, the user is given the opportunity to interact with other parts of the software in the future and information is displayed regarding which files the program is currently interacting with Figure 6.

Also, the user is given the opportunity to interact with other software tabs, namely: "Config" and "STL movement".

By opening the Config tab, the user can see that it is possible to individually select the print settings, since each 3D printer may have its own limitations and configurations. Among the most common that have been added to the product configuration are:

- Print track diameter (default value 1.3mm);
- Printing speed (8.1(6) mm/s);
- Largest angle between two layers (5).

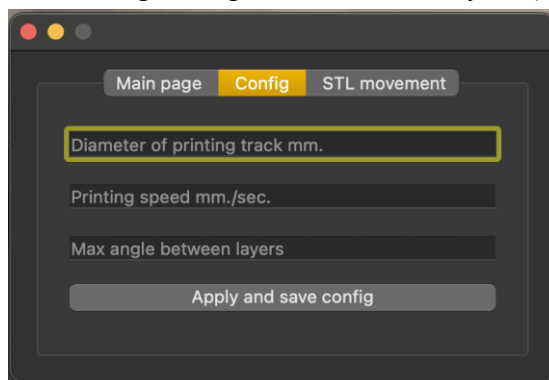


Figure 7 - Tab for adjusting individual printer parameters

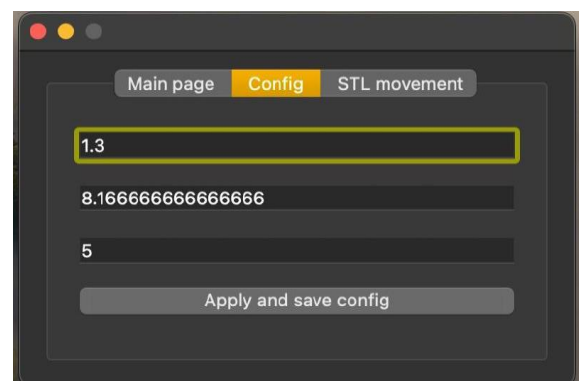


Figure 8 - Setting the default parameters of the printer

The default values in the software look like Figure 8.

Also, sometimes there are cases when the shape located in the .stl file will have its conditional center not at the origin or it needs to be transferred due to the specifics of the 3D printer, in which case it is possible to fix this using the third tab "STL movement", which will allow the user to center the shape as needed:

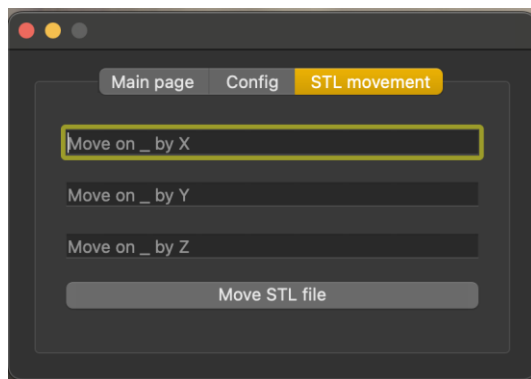


Figure 9 - Functionality for centering the shape to be printed

When you return to the "Main menu" tab and click the "Convert file(s) to trajectory" button, all selected stl files will be converted to path files with a .txt extension, and a print trajectory graph will appear at the end. Let's look at the example of two existing .stl models, one of which is a cube and the other is a ring. Fig. Figure 10 shows the print path for the cube figure, which was read from the cube.stl file, and Fig. 11 - the print path for the ring shape that was read from the round.stl file.

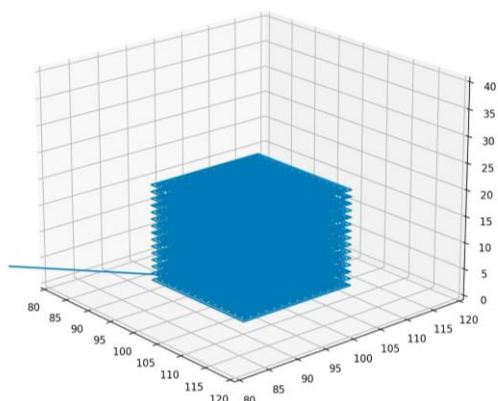


Figure 10 - Cube shape printing trajectory

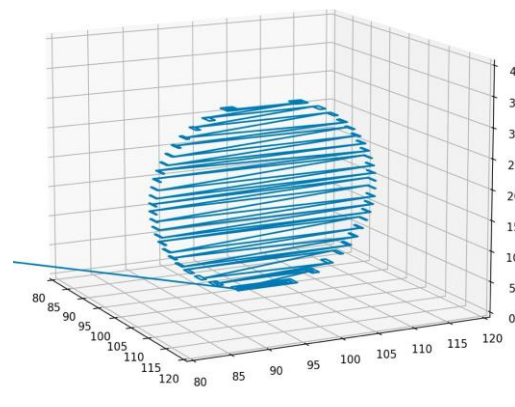


Figure 11 - Trajectory of printing a ring shape

Also, when you click on the "View plot(s) of .stl files" button, the user will be given a trajectory of building a figure in animated variations, which allows the user to observe the process of this construction from the beginning to the final strokes. Consider this using the example of Fig. 12-14 for a cube figure.

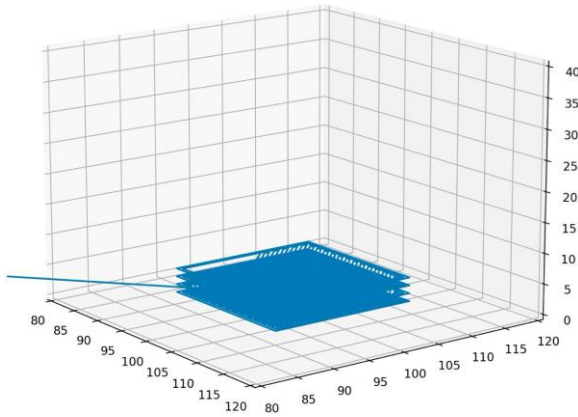


Figure 12 - Trajectory of printing a cube shape by 25 percent

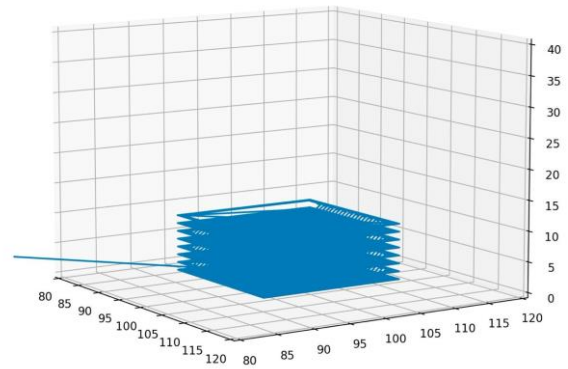


Figure 13 - Trajectory of printing a cube figure by 50 percent

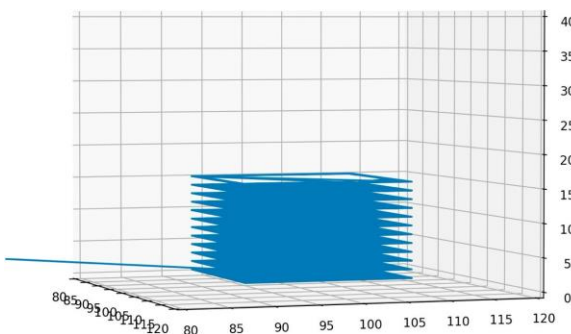


Figure 14 - 75 percent cube shape printing trajectory

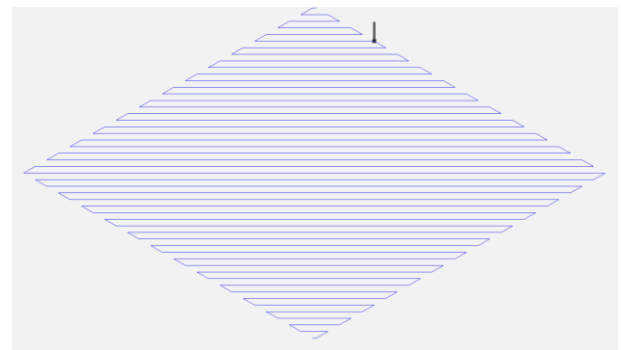


Figure 15 - Printing trajectory of the first layer of the cube shape

Since the user is given the opportunity to observe the progress of drawing the trajectory of the figure, it is possible to adjust the g-code at the necessary stages, if such a need arises.

The result of the program is g-code, which issues commands for a 3D printer, building each layer step by step using the g-code simulator, you can see the printing process and follow the implemented trajectory.

Conclusions. As a result of the study, a software product was developed aimed at building and implementing the optimal trajectory of printing on a 3D printer using a systematic approach. The importance of trajectory optimization to reduce printing time and improve the quality of manufactured products is substantiated.

During the implementation of the work, the skills of software development were improved, using modern technologies using the Python programming language, its libraries and algorithms. A step-by-step approach is made to maintain the system for various existing parts. Some algorithmic solutions have been mastered, the functional support of various systems has been improved, and the skills of working with 3D printers have been improved.

The developed software tool allows the user to import the object model in STL format and then automatically generates the optimal path for 3D printing. An important step is the

ability to visualize the figure at different stages of printing, which allows you to analyze and improve the manufacturing process.

The developed algorithm for building a trajectory is based on a systematic approach, which allows you to effectively take into account various parameters and constraints. It takes into account the path length spent printing each layer and uses advanced algorithms to solve the path optimization problem.

The final product is capable of displaying the G-code, which is the standard for numerical control of devices, and allows precise instructions to be transmitted to the printer to reproduce the selected model. Taking into account the above, the developed tool meets modern requirements and standards in the field of 3D printing, providing the user with convenience and high accuracy in the manufacture of objects. In the future, the resulting system can be improved and scaled by adding new features, and, if necessary, its use can be expanded.

LITERATURE / REFERENCES

1. Lechowicz P., Koszalka L., Pozniak-Koszalka I., Kasprzak A. Path optimization in 3D printer: Algorithms and experimentation system, 2016
2. Ma Z., Wan W., Song L., Liu C., Liu H., Wu Y. An Approach of Path Optimization Algorithm for 3D Concrete Printing Based on Graph Theory, 2022
3. Fok K.-Y., Cheng C.-T., Ganganath N., Ho-Ching Iu H., K. Tse C. An ACO-Based Tool-Path Optimizer for 3-D Printing Applications, 2016
4. Dreifus G., Goodrick K., Giles S., Patel M., Foster R. M., Williams C., Lindahl J., Post B., Roschli A., Love L., Kunc V. Path Optimization Along Lattices in Additive Manufacturing Using the Chinese Postman Problem, 2017
5. Iori M., Novellani S. Optimizing the Nozzle Path in the 3D Printing Process, 2020
6. Fok KY., Cheng CT., Ganganath N., Iu HHC., Chi KT. Accelerating 3D Printing Process Using an Extended Ant Colony Optimization Algorithm, 2018
7. Cheong KJ., Path Optimization For Cooperative Multi-Head 3d Printing, 2020
8. Kiselova, O.M. Stanovlennia ta rozvytok teorii optymalnoho rozbytta mnozhyn. Teoretychni i praktychni zastosuvannia: monohrafiia. Dnipro: Lira, 2018. 532 s. [Ukrainian]

Received 20.03.2025.
Accepted 24.03.2025.

Алгоритми та методи в динамічних задачах оптимального розміщення доріжок у тривимірному друку

Робота присвячена вивченню алгоритмів і методів розрахунку оптимальних траєкторій при 3-D друці в динамічній постановці задачі теорії оптимального розбиття множин. Актуальність цього завдання полягає в значній актуалізації 3-D друку, як при виготовленні медичної, військової, так і виробів подвійного призначення. У наш час технологічні рішення для 3-D друку дозволяють користувачам виготовляти деталі від дитячих іграшок із пластику до деталей ракет із високолегованої сталі. В умовах війни 3D-друк став для України інструментом удосконалення зброї, що дозволяє створювати експериментальні продукти в невеликих кількостях без ресурсомістких досліджень, досліджувати їх ефективність та застосовність на практиці, вдосконалювати та запускати в масове виробництво. У статті розглянуто математичні аспекти побудо-

ви траєкторій 3-D друку з урахуванням обмежень, що висувуються виробниками в математичній постановці. Такий підхід дозволяє отримати оптимальні рішення, мінімізувати час і витрати на доопрацювання деталей, і в цілому скоротити час і витрати на їх виготовлення. Слід зазначити, що такий підхід дуже актуальний в часі, що обумовлено великою кількістю нових винаходів, які розробляються в різних сферах людського існування. Приклади застосування технології показано на простих прикладах, які дозволяють оцінити роботу алгоритмів та методів на модельних тривимірних об'єктах. Більш складні тривимірні об'єкти можна, як правило, представити як сукупність простих, що підкреслює актуальність даних досліджень.

Ключові слова: математичне моделювання, теорія оптимального розбиття множин, динамічна задача, 3-D друк, оптимальна траєкторія.

Кузенков Олександр – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики факультету прикладної математики та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Kuzenkov Oleksandr – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Cybernetics, Faculty of Applied Mathematics and Information Technologies, Dnipro National University named after Oles Honchar.

К.Ю. Островська, В.Г. Порохнявий

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВІДСТЕЖЕННЯ ПОГЛЯДУ ТА ФІКСАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ

Анотація. В роботі представлено порівняння нейромережесих моделей для відстеження погляду та фіксації об'єктів.

У цій роботі були вивчені алгоритми виявлення подій з різних областей: I-VT і I-DT, засновані на порогових значеннях, модель випадкового лісу в галузі машинного навчання і модель CNN в галузі глибокого навчання.

Була проведена оцінка ефективності їхньої класифікації з використанням одного і того ж набору даних для всіх методів. Також обговорювався взаємозв'язок між програмами та алгоритмами. Результати показали критичний вплив порогових значень класифікацію алгоритмів I-VT і I-DT. У зв'язку з цим пошук оптимального порогу алгоритмах, заснованих на порогових значеннях, є складним завданням. Алгоритми RF і CNN перевершують алгоритми, засновані на порогових значеннях, за всіма показниками продуктивності та здатні класифікувати дані щодо кількох класів.

Проведено тестування та порівняння різних АВП (алгоритмів виявлення подій). Дано теоретичні та експериментальні обґрунтування отриманим результатам. За результатами проведених експериментів було обрано найкращий наших завдань АВП (алгоритмів виявлення подій).

Також описані засоби реалізації до створення докладання. Описано переваги та недоліки обраних рішень. Вирішено технічні проблеми, що виникли. Спроектовано архітектуру, розроблено макет програми виходячи з необхідних завдань.

Ключові слова: машинне навчання, random forest, алгоритмів виявлення подій, додаток, саккада. плавне переслідування, постсаккадичні коливання, глісади згорткова нейронна мережа.

Вступ. Відстеження руху очей використовується у різноманітних сферах досліджень, таких як когнітивна наука, психологія, неврологія, інженерія, медицина та маркетинг.

Відстеження руху очей також використовується для керування автомобілем. Це робить цю технологію вкрай міждисциплінарною та використовується у різних сферах. Це також відображається в тому, як з часом розроблялися апаратне та програмне забезпечення для трекінгу очей.

В останні роки інтерес до алгоритмів виявлення подій (АВП) відновився у зв'язку із застосуванням до проблеми методів машинного навчання та появи баз даних. Розро-

бка програми, що використовує АВП дозволить розширити можливості застосування та вивчення алгоритмів.

Метою роботи є дослідження нейромережових моделей для відстеження погляду та фіксації об'єктів.

Опис набору даних. Для перевірки ефективності АВП буде використано загальнодоступний набір даних, записаний за допомогою високошвидкісного очного трекера 1250, фірми SensoMotoric Instruments (Teltow, Німеччина) на частоті 500 Гц.

При створенні датасета випробуваним пред'являлися статичні зображення, тексти, відеокліпи і прості точкові подразники, що рухаються. Дані були позначені вручну двома братами Маркусом Нюстромом та Річардом Андерсоном. Вони були розділені на наступні категорії: фіксації, саккади, пост-саккадичні коливання, плавне слідування, моргання та невизначені. Для цього дослідження використовувалися дані про перегляд зображень, позначені фіксаціями, саккадами та постсаккадичними коливаннями. Дані датасета відображені на рисунку 1 і є «сирими» даними. На рисунку 2 дані поділені на фіксації.

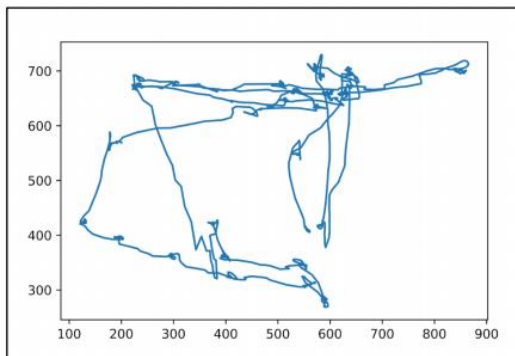


Рисунок 1 – Візуалізація даних датасету

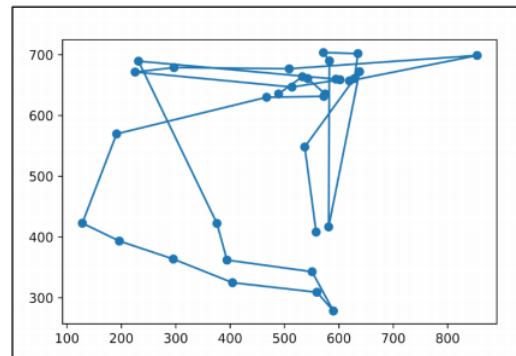


Рисунок 2 – Розмічені дані, на яких відображено фіксацію

Алгоритми. Алгоритми, що використовують граничне значення і які використовувались в роботі це:

- I-DT (визначення порогового значення дисперсії). Особливістю даного алгоритму є те, що він демонструє низьку ефективність при виявленні фіксацій та саккад, коли сигнал сильно зашумлений. У зв'язку з цим вибір порогових значень є найважливішим і безпосередньо впливатиме на ефективність класифікації.

Отримані результати відображено на рисунку 3. За ними можна говорити, що збільшення порогового значення дисперсії збільшує точність визначення фіксацій, але зменшує точність визначення саккади. При цьому зменшення порогового значення зменшує точність виявлення фіксації та збільшує виявлення саккади.

При значенні порогової дисперсії, що дорівнює 7-ми, точність виявлення фіксацій становить 99%, при цьому точність визначення саккади становить 82%. При пороговому значенні, що дорівнює 1-му, вже точність визначення саккади дорівнює 99%, але точність виявлення фіксації всього 39%.

Було вибрано оптимальне значення порогового значення, що дорівнює 3,5. При даному значенні можна отримати точність визначення фіксації 95% і точність виявлення саккади 93%.

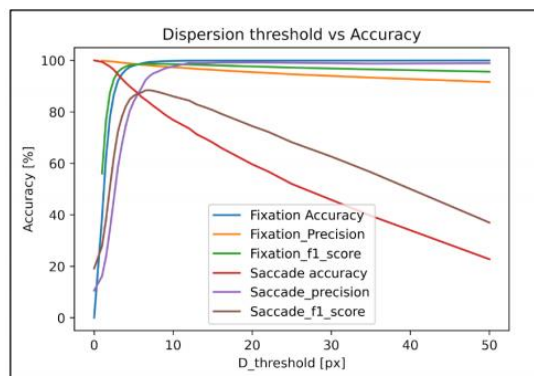


Рисунок 3 – Залежність точності визначення фіксацій та саккад для алгоритму I-DT від порогового значення дисперсії

• I-VT - Алгоритм визначення порогового значення швидкості (velocity threshold algorithm) є ще один алгоритм і основу для автоматизованого і об'єктивного стандартного алгоритму виявлення подій. Цей підхід використовувався в багатьох дослідженнях. Він заснований на тому факті, що саккадичні рухи очей характеризуються вищими значеннями швидкості, порівняно з рухами при фіксації. Профілі швидкостей рухів очей демонструють два основні розподіли швидкостей: низькі швидкості для фіксації та високі швидкості для саккад. Метод I-VT ідентифікує події шляхом обчислення швидкості руху від точки до точки, а потім класифікує подію як фіксацію або саккаду на основі значення цієї швидкості. Класичний метод I-VT призначений для класифікації тільки фіксацій та саккад на основі вхідних даних, отриманих при відстеженні руху очей.

На рисунку 4 показано вплив зміни порогових значень швидкості ефективність класифікації алгоритму I-VT. Точності класифікації кожного класу вимірюються з використанням коефіцієнтів запам'ятовування, точності та F1-балів, розрахованих на основі матриці помилок.

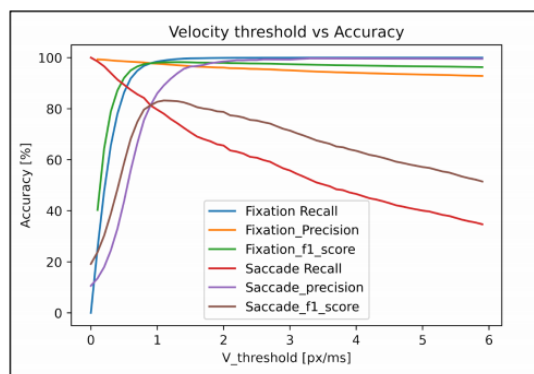


Рисунок 4 – Залежність точності визначення фіксацій та саккад алгоритму I-VT від порогових значень

У прикладі I-VT забезпечує максимальну точність фіксації на рівні 99% при пороговій швидкості 3,5 пікселів в секунду, а точність відтворення саккади трохи знижується при збільшенні порогового значення швидкості. Повторення саккад досягає 98%, а повторення фіксації - 25% при найменшому пороговому значенні швидкості, що дорівнює 0,1 пікселя в секунду, так як при цьому пороговому значенні більшість точок класифікуються як саккади. Через вплив граничного значення на точність класифікації алгоритму I-VT важливо визначити оптимальне граничне значення для обох методів фіксації та точності виконання саккади. Таким чином, у даному випадку оптимальне граничне значення швидкості для I-VT становить 0,5 пікселів в секунду.

Також в роботі використовувались алгоритми машинного навчання:

Random Forest (RF) – випадковий ліс та Convolutional neural network (CNN) – згортоква нейронна мережа.

Random Forest (RF) – випадковий ліс.

Повністю автоматизована класифікація подій, пов'язаних із рухом очей, із використанням класифікатора Random Forest для класифікації фіксацій, саккад та постсаккадичних коливань. Ефективність класифікації порівняли із сучасними алгоритмами та експертами, які працюють вручну. Результати показали, що алгоритм машинного навчання перевершує сучасні алгоритми та майже досягає продуктивності експертів. Однак, ця продуктивність була досягнута тільки для високоякісних даних з низьким рівнем шуму.

На рисунку 5 показано матрицю помилок для оцінки вибірки за вибіркою. Фіксації правильно позначені у 97 % випадків, тоді як ПСК і саккад є тенденція до того що, щоб їх позначали як фіксації. Саккада і ПСК правильно ідентифікуються у 91% та 76% кадрів відповідно. Близько 7% ПСК помилково класифікуються як фіксація, а 17% ПСК класифікуються як саккада. Це тому, що більшість навчальних подій були фіксаціями, і модель, природно, прагне класифікувати всі неоднозначні вибірки як фіксації.

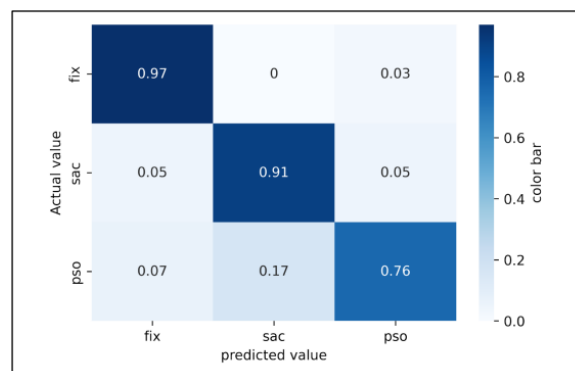


Рисунок 5 – Матриця помилок класифікатора

У таблиці 1 подано метрики роботи класифікатора Random Forest. Результати класифікації показують, що RF добре справляється з класифікацією фіксацій та саккад. У цьому ефективність виявлення ПСК далекою від ідеалу.

Метрики класифікатора

	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
Фіксація	97%	99%	97%	98%
Саккада	92%	87%	91%	89%
ПСК	76%	64%	76%	69%

• Convolutional neural network (CNN) – згортова нейронна мережа - добре підходить для аналізу закономірностей даних, тому їх можна використовувати для виявлення подій, пов'язаних з рухом очей.

Ця мережа кожної вибірки передбачає ймовірності приналежності до фіксації, саккади чи плавному переслідування з урахуванням послідовності вибірок погляду. Цей метод спрямований на усунення недоліків попередніх методів, які використовували форму та амплітуду сигналу для визначення чи класифікації руху очей, що може бути проблематично, наприклад, при плавному русі.

Щоб перевірити здатність мережі CNN класифікувати події, пов'язані з рухом очей, створено просту мережу, представлену на рисунку 6. Як вхідні дані мережа використовує безперервний потік двовимірних вибірок погляду.

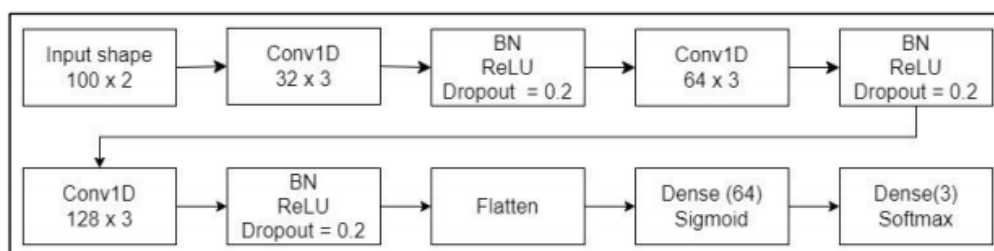


Рисунок 6 - Архітектура згорткової нейронної мережі

На рисунку 7 представлено матрицю помилок для класифікації CNN.

Фіксації правильно класифікуються у 99% випадків, саккади – у 88%, а ПСК – у 76% випадків. Загалом 4% саккад помилково класифікуються як фіксації, а 16% ПСК – як хибні фіксації. Крім того, 8% саккад класифікуються як ПСК.

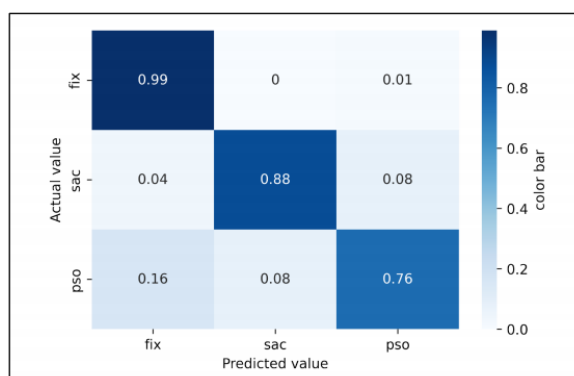


Рисунок 7 – Матриця помилок згорткової нейронної мережі

У таблиці 2 представлені метрики роботи згорткової нейронної мережі. Результати класифікації показують, що CNN добре справляється з фіксацією та класифікацією саккад. Проте ефективність класифікації для ПСК далека від ідеалу.

Таблиця 2

Метрики для згорткової нейронної мережі

	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
Фіксація	99%	98%	99%	99%
Саккада	89%	93%	89%	91%
ПСК	75%	83%	75%	79%

Аналіз результатів. Для порівняння роботи різних алгоритмів було проведено оцінку продуктивності чотирьох різних алгоритмів класифікації подій з областей порогових значень, машинного навчання та глибокого аналізу. Також було враховано спільну роботу двох оцінювачів-людей.

Результати показали, що I-DT працює краще, ніж I-VT, за всіма показниками продуктивності. Проте алгоритми RF і CNN перевершили алгоритми з урахуванням порогових значень (I-VT і I-DT) за всіма показниками продуктивності, крім повноти для саккади (recall метрика). У разі класифікаційних моделей RF і CNN суттєвої різниці у класифікації фіксацій та саккад не виявлено.

Результати для I-VT та RF представлені на рисунках 8 та 9 відповідно. Алгоритм I-VT виявив 189 фіксацій із середньою тривалістю 121 мс, тоді як алгоритм CNN виявив лише 64 фіксації із середньою тривалістю 121 мс. Середня тривалість становила 264 мс. Це добре видно на рисунках 8 та 9.

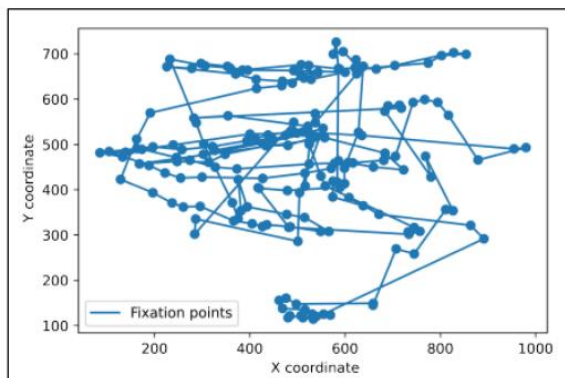


Рисунок 8 – Результат роботи алгоритму I-VT (при граничному значенні 3.5 px/ms)

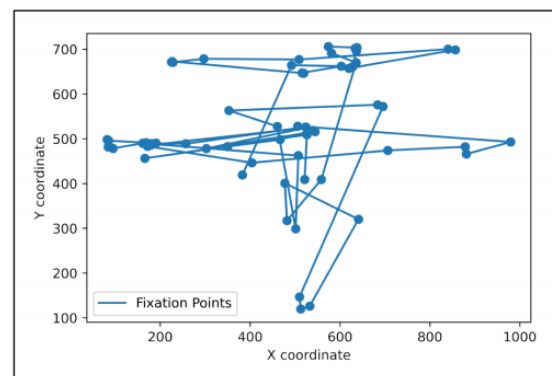


Рисунок 9 – Результат роботи алгоритму CNN

Основу для функціонування системи складатиме середовище розробки Unity, алгоритм класифікації подій, написаний мовою Python, а також API, яке пов'язуватиме середовище Unity та алгоритм для обробки даних.

Порівняльна таблиця

	I-VT	I-DT	RF	CNN
Fixation F1-score	94%	96%	99%	99%
Saccade F1-score	60%	66%	87%	91%
PSO F1-Score	–	–	64%	79%

Висновки. У цій роботі були вивчені алгоритми виявлення подій з різних областей: I-VT і I-DT, засновані на порогових значеннях, модель випадкового лісу в галузі машинного навчання і модель CNN в галузі глибокого навчання.

Була проведена оцінка ефективності їхньої класифікації з використанням одного і того ж набору даних для всіх методів. Також обговорювався взаємозв'язок між програмами та алгоритмами. Результати показали критичний вплив порогових значень класифікацію алгоритмів I-VT і I-DT. У зв'язку з цим пошук оптимального порогу алгоритмів, заснованих на порогових значеннях, є складним завданням. Алгоритми RF і CNN перевершують алгоритми, засновані на порогових значеннях, за всіма показниками продуктивності та здатні класифікувати дані щодо кількох класів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Komogortsev O.V., Gobert D.V., Jayarathna S., Koh D. H., Gowda S.M. // IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010. - 2635-2645 pp.
2. Birawo B., Kasproski P. Review and Evaluation of Eye Movement Event Detection Algorithms. // Sensors, 2022. - 1-10 pp.
3. Startsev M., Zemblys R. Evaluating Eye Movement Event Detection: A Review of the State of the Art. // Behavior research methods, 2023. - 1653-1714 pp.
4. Andrew Duchowski. Eye Tracking Methodology Theory and Practice. // Springer Science & Business Media, 2007. - 55-57 pp.
5. Holmqvist K., Nyström M., Andersson R., Dewhurst R., Jarodzka H., Weijer J. Eye Tracking. A Comprehensive Guide to Methods and Measures. // OUP Oxford, 2011. - 45-47 pp.
6. Bojko A. Eye Tracking the User Experience. A Practical Guide to Research. // Rosenfeld Media, 2013. - 89-92 pp.
7. Wedel M., Pieters R. Eye Tracking for Visual Marketing // Now Publishers, 2008. - 101-106 pp.
8. Conklin K., Pellicer A., Carrol G. Eye-Tracking Guide for Applied Linguistics Research. // Cambridge University Press, 2018. - 143-145 pp.

Received 21.03.2025.
Accepted 24.03.2025.

Research on neural network models for eye tracking and object fixation

The paper presents a comparison of neural network models for eye tracking and object fixation.

In this paper, event detection algorithms from different domains were studied: I-VT and I-DT, based on threshold values, a random forest model in the field of machine learning, and a CNN model in the field of deep learning.

Their classification performance was evaluated using the same dataset for all methods. The relationship between programmers and algorithms was also discussed. The results showed the critical impact of threshold values on the classification of I-VT and I-DT algorithms. In this regard, finding the optimal threshold for threshold-based algorithms is a difficult task. RF and CNN algorithms outperform threshold-based algorithms in all performance indicators and are capable of classifying data into multiple classes.

Various ABCs (event detection algorithms) have been tested and compared. Theoretical and experimental justifications for the results obtained have been given. Based on the results of the experiments, the best ABC for our tasks (event detection algorithms) has been selected.

The means of implementation for creating the application are also described. The advantages and disadvantages of the selected solutions are described. The technical problems that have arisen have been solved. The architecture has been designed, and a program layout has been developed based on the required tasks.

Keywords: machine learning, random forest, event detection algorithms, application, saccade, smooth pursuit, post-saccadic oscillations, glide paths, convolutional neural network.

Островська Катерина Юріївна – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ «ДМетІ» УДУНТ.

Порохнявий Вячеслав Григорович - магістр кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ «ДМетІ» УДУНТ.

Ostrovskaya Kateryna – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Systems of the Scientific Research Institute "DMetI" UDUNT.

Porokhnyavyy Vyacheslav Grigorovich - Master of the Department of Information Technologies and Systems of the Scientific Research Institute "DMetI" UDUNT.

USE OF TYPICAL 3D PRIMITIVE BODIES IN AUTOCAD PROGRAM FOR SOLVING POSITIONAL PROBLEMS OF DESCRIPTIVE GEOMETRY

Abstract. Teaching graphic disciplines to students of technical specialties is the foundation of engineering education. Analysis of academic performance in “Descriptive Geometry” and “Engineering Graphics” courses has shown that the main reason for the decline in results in recent years is the lack of basic knowledge obtained in secondary school. In order to improve the effectiveness of teaching and optimize the learning process, it is necessary to introduce new methods that develop spatial thinking and professional skills. Knowledge of geometric primitives and methods of sectioning shapes is the basis for working in AutoCAD. Effective use of these tools allows you to create complex design solutions and greatly simplify the work in design.

It should be noted that solving geometric problems is done in parallel on both complex drawings and visualizations using the same principles.

This paper shows the use of computer visualization to study sections of three-dimensional bodies (cone, sphere, cylinder) by plane with the help of AutoCAD program. AutoCAD, being a powerful 2D and 3D design tool, provides a wide range of geometric primitives that are the basis for creating complex drawings and models. One of the key aspects of working with these primitives is the ability to create cross sections of shapes, which allows you to visualize the internal structure of objects and analyze their properties. This approach helps to better prepare future engineers to solve practical problems. The simplicity of creating a computer model contributes to the conscious formation of spatial thinking and development of volumetric imagination, as well as to the acquisition of skills in analyzing drawings and geometric constructions. Importantly, AutoCAD also offers the ability to create layered sections, which can greatly enhance teaching and learning in a variety of formats, including lectures, hands-on labs, and distance learning. This software allows instructors to create and share detailed visual representations of concepts, fostering deeper understanding and engagement.

Keywords: descriptive geometry, engineering and computer graphics, modeling, primitive bodies, AutoCAD, positional problems.

Introduction. Descriptive geometry is a graphic discipline that studies methods of depicting three-dimensional objects on the plane, helping to visualize objects and their relationships in space. It is widely used in various fields, making it an important tool for professionals [1-3].

Descriptive geometry includes a set of geometric techniques that allow a three-dimensional space to be represented in the plane. Thus, it is possible to solve spatial problems in 2D in a way that guarantees the reversibility of the process. Essentially, descriptive geometry is a language that allows us to communicate about shape and space. It is the basis for many professions related to engineering, construction, design and mechanical engineering. Without the knowledge of descriptive geometry, it would be very difficult to create complex objects and bring our ideas to life [1-5].

This language that is descriptive geometry has its own alphabet and grammar. The alphabet is points, lines, planes, the basic elements from which everything else is built. The grammar is the system of rules that define how these elements are projected onto a plane, how they interact with each other in a projection, and how we can extract information about a real three-dimensional object from these projections [1-3].

It underpins many engineering disciplines, architecture and design. Thus, descriptive geometry is an indispensable tool in a wide variety of fields, providing accuracy, clarity and efficiency in design and development [4,5].

Literature Review. The basic principles of engineering graphics have not changed much since the age of Monge [1,2]. However, the last two hundred years have seen an evolution in methods and tools, as well as in standards and conventions, marked by a shift from drawing aids such as the drawing wheel and the scribe to computer-aided design systems [3-9].

CAD systems provide a number of tools that allow positioning and identification of objects without the need to create complex geometric constructions [2-7]. To solve problems in CAD, a three-dimensional model is created and the appropriate commands are applied to it [7]. This provides significant advantages over traditional manual drawing methods [3-9].

In particular, CAD allows transforming the form represented in the computer projective space into a digitized coordinate form by means of transformations providing parallel projections of perspective views [3-9].

Analysis of works [5,7], the study of academic performance in the disciplines “Descriptive Geometry” and “Engineering Graphics” has revealed that the deterioration of indicators in recent years is largely due to insufficient training received at secondary school. In order to improve the effectiveness of training and optimize the learning process, it is important to introduce new techniques that promote the development of spatial thinking and professional skills.

It should be noted that to date, little attention has been paid to the use of 3D modeling in AutoCAD to solve positional problems in descriptive geometry. **The purpose of this paper** is to use graphical modeling using 3D primitive objects in the AutoCAD environment, to analyze and solve problems related to the dissection of three-dimensional bodies by a plane.

Research methodology and results. Most drawings are two-dimensional projections of three-dimensional objects, which is the standard approach for engineers and architects. However, this method is limited due to the difficulty of analyzing such projections. In contrast, the AutoCAD software package has powerful capabilities for creating three-dimensional models and designs [2,4-7]. The AutoCAD graphics package has powerful tools

for modeling structures and creating objects in three dimensions. Designing in three-dimensional space allows you not only to reproduce the shape of an object in detail and show it from different points of view, but also to apply coloring, tinting, and even animation to the created objects.

AutoCAD allows you to create three types of three-dimensional objects: wireframe, polygonal (surface), and solid. Each type has its own technique for creating and editing.

Solid modeling is the easiest type of 3D modeling to use. AutoCAD's modeling tools allow you to create 3D objects based on basic spatial shapes (parallelepipeds, cones, cylinders, etc.), as well as by extruding (squeezing) and rotating 2D objects around an axis. Further modification occurs by combining, subtracting, and intersecting the created spatial forms, as well as by editing the edges (conjugation, chamfering, etc.). AutoCAD also provides tools for making cuts and sections of bodies.

The 3D modeling workspace is recommended for working in 3D. You can switch from the current workspace to another workspace with its own set of tools, palettes, and ribbon panels by selecting from the drop-down list in the WSCURRENT toolbar.

You can create 3D solid objects from basic primitives using commands: Box, Cylinder, Cone, Sphere, Pyramid, Wedge, and Torus (Fig. 1).



Figure 1 - 3D solid objects AutoCAD

The Cylinder command builds a straight circular and elliptical cylinder (Fig. 2). When selecting, we specify the position of the center, the diameter of the base, and the height of the cylinder.

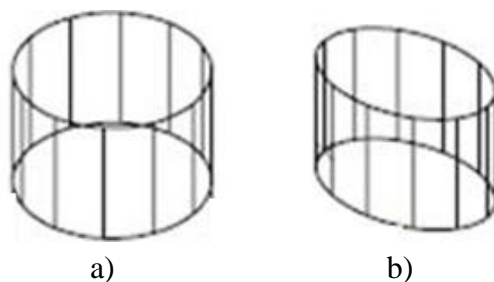


Figure 2 - Straight circular cylinder (a) and elliptical cylinder (b)

The Cone command builds a straight cone with cylindrical (Fig. 3,a) and elliptical bases (Fig.3,b). When selecting, specify the position of the center, the diameter of the base, and the height of the cone.

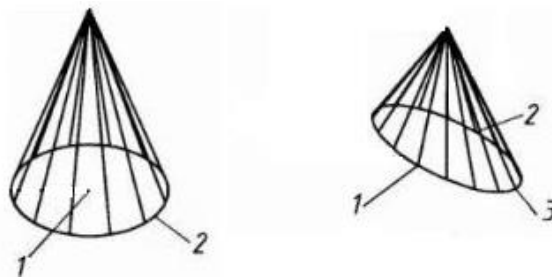


Figure 3 - Rectangular cone with cylindrical (a) and elliptical bases (b)

The Pyramid command builds a regular pyramid by its center and the value of the radius (diameter of the circle described (inscribed) around the polygon of the base) (Fig. 4).

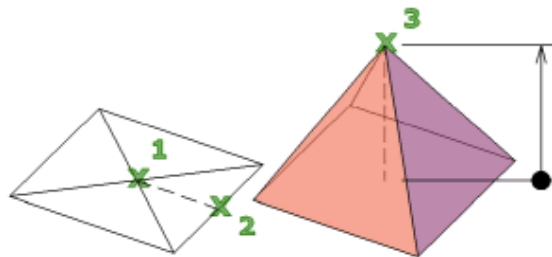


Figure 4 - Building a pyramid

For example, the Figure 5 shows the problem of descriptive geometry - section of a straight cone with a plane as a three-dimensional figure and projections on the basic planes

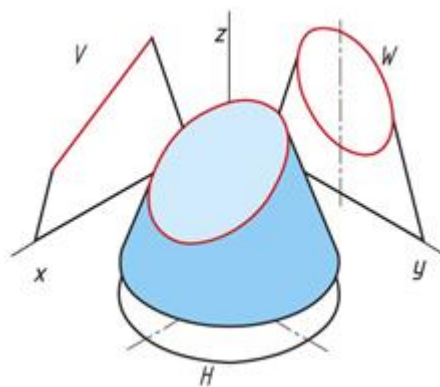


Figure 5 - Building a pyramid

The graphics area in the model space has been divided into several separate rectangular areas - so-called viewports, which display our model in different views (Fig. 6-8). For visualization of three-dimensional shapes (cone, prism), we used the Slice command, which allows us to define a secant plane using three points. The results of modeling are shown in Fig. 6-8.

As it follows from Fig.6-8, the construction of primitives does not cause special difficulties. An important point when using basic elements is the ability to build cross-sections of objects, which makes it possible to see their internal structure and study the

characteristics of figures in cross-sections. This method effectively prepares future specialists to solve real engineering problems.

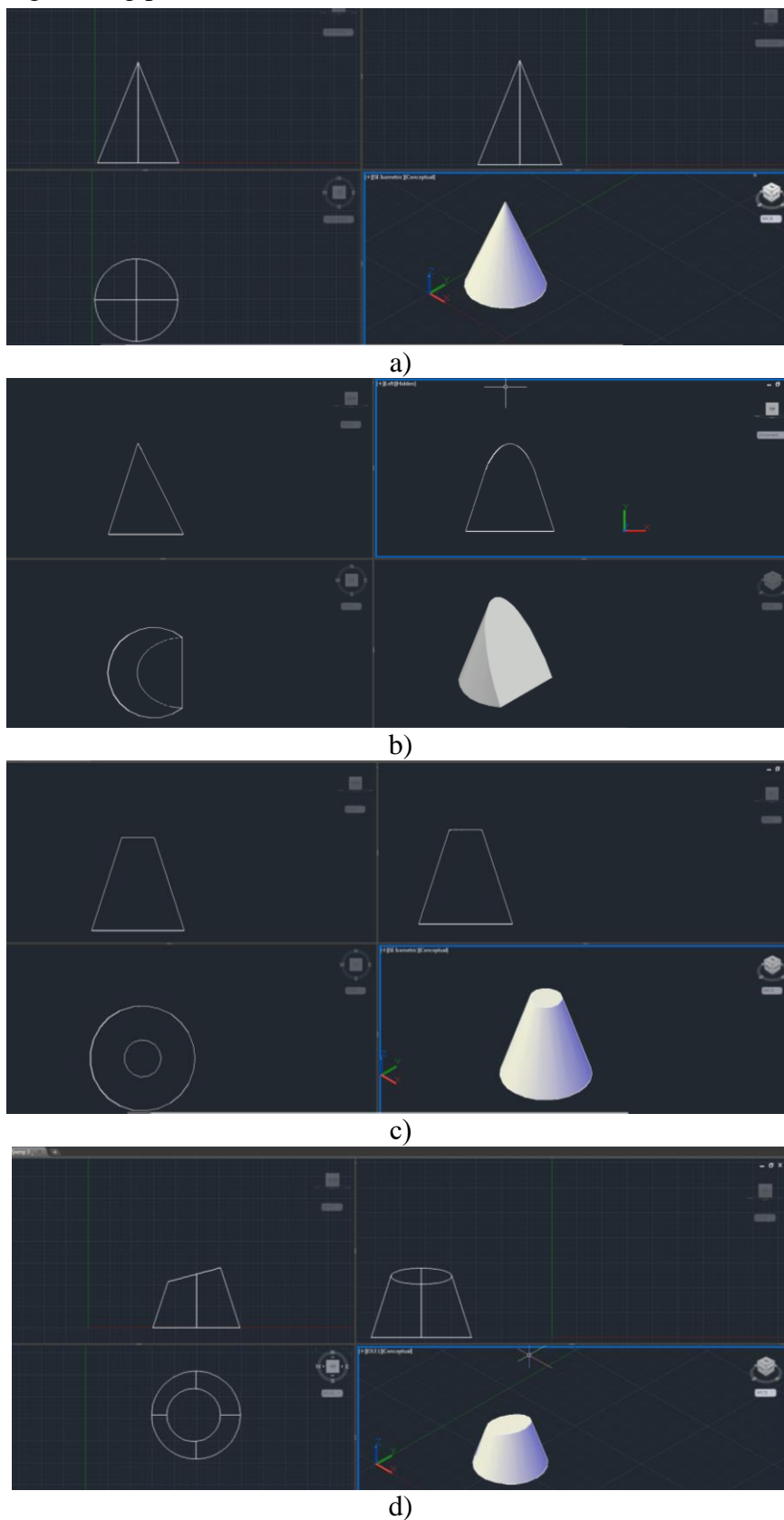
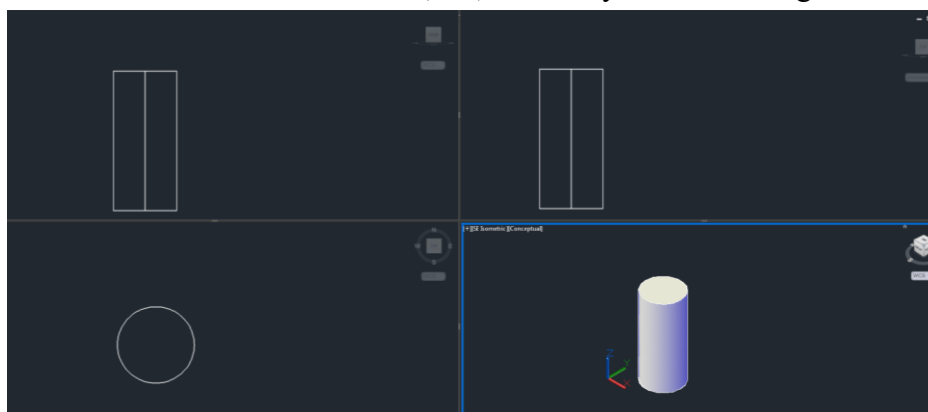
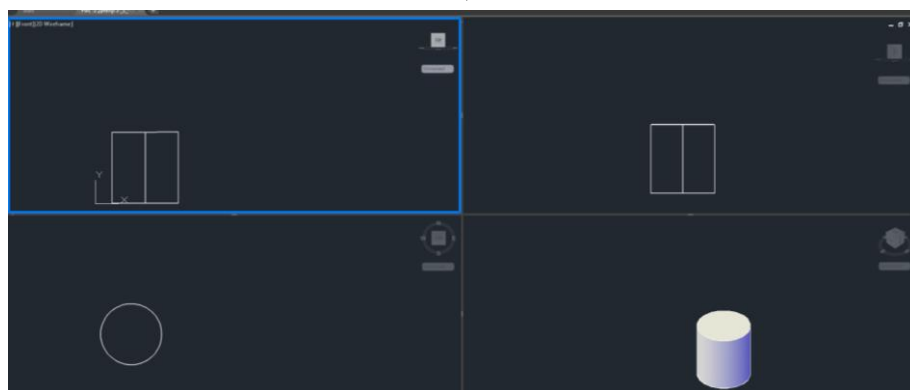


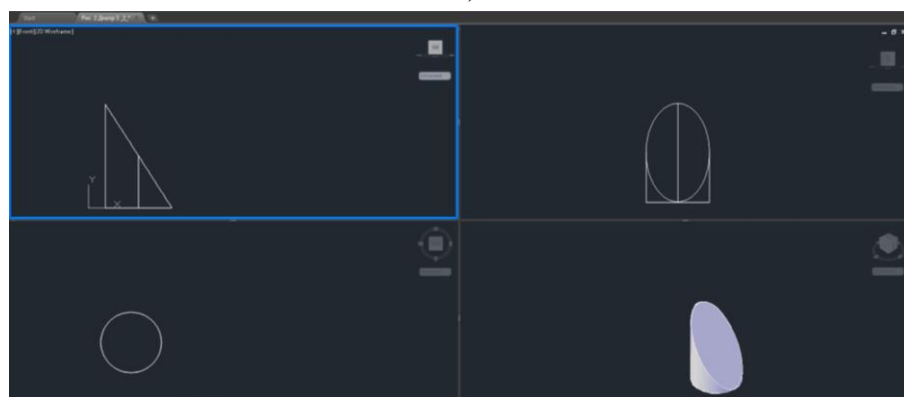
Figure 6 - 3D models and projections of a cone on principal planes truncated by a plane at different angles to the base



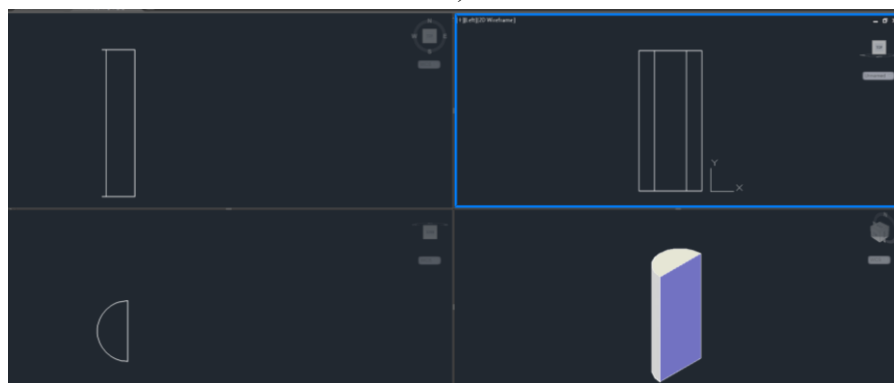
a)



b)

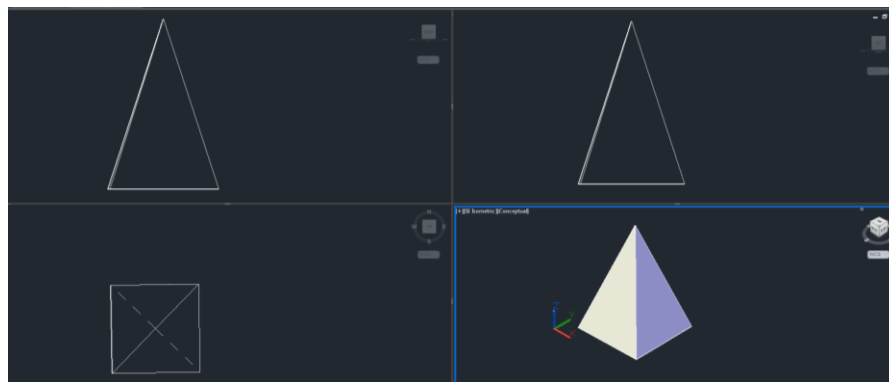


c)

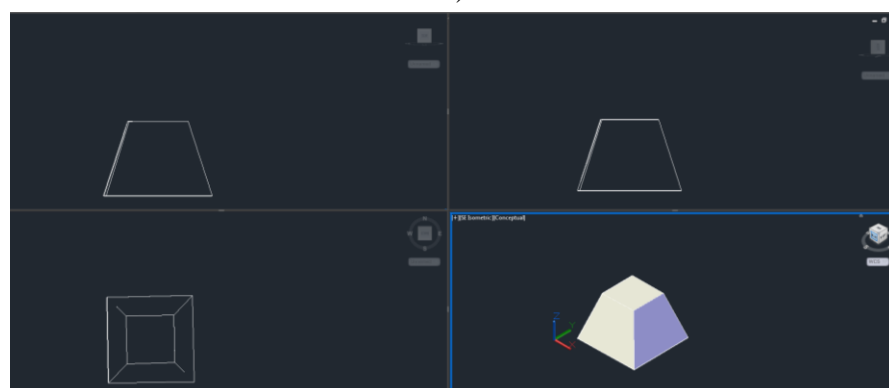


d)

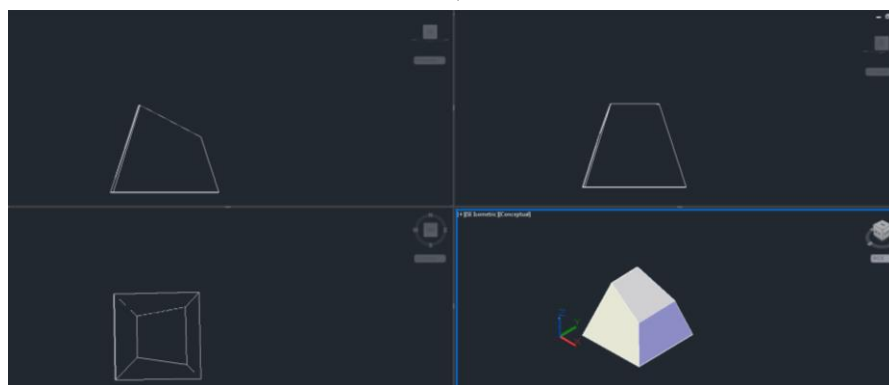
Figure 7 - 3D models and projections of a cylinder on the principal planes truncated by a plane at different angles to the base



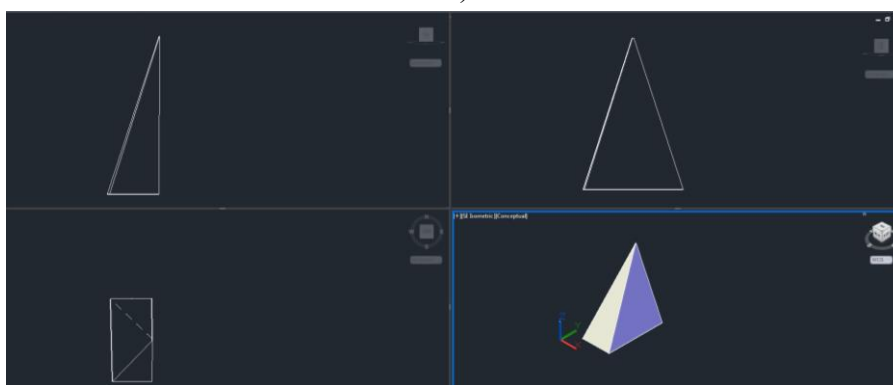
a)



b)



c)



d)

Figure 8 - 3D models and projections of a pyramid on the principal planes truncated by a plane at different angles to the base

The ease of creating a virtual model contributes to the development of spatial perception and three-dimensional imagination, as well as allows you to master the skills of reading drawings and performing geometric constructions. It is worth emphasizing that AutoCAD also supports the creation of multi-component sections.

As it follows from Fig.6-8, the construction of primitives does not cause special difficulties, gives the opportunity to visualize the obtained cross-sections of figures in the secant plane. This approach contributes to the conscious formation of spatial thinking and the development of volumetric imagination, as well as the acquisition of skills in analyzing drawings and geometric constructions.

Utilizing viewports has significantly streamlined the process of working on intricate and cluttered drawings. Familiarity with these tools and commands will empower students to develop more complex and precise models, ultimately enhancing both the efficiency and quality of their designs. Additionally, students can access AutoCAD for free, as educational versions are available on the developer's website.

In addition, using cross sections in AutoCAD helps you analyze your designs in greater depth. For example, when designing machines and mechanisms, cross sections can help identify potential problems with component placement, such as insufficient space for maintenance or possible conflicts between moving parts. This avoids costly changes at later stages of design and production.

Conclusions. In the world of computer-aided design, AutoCAD plays a key role by providing powerful tools for creating and manipulating geometric objects. Computer visualization is the general name for graphical methods of creating, analyzing, and communicating information. The construction of primitives does not cause special difficulties, gives the opportunity to visualize the obtained cross-sections of figures in the secant plane. This approach contributes to the conscious formation of spatial thinking and the development of volumetric imagination, as well as the acquisition of skills in analyzing drawings and geometric constructions. The use of viewports has made it much easier and faster to work on a complex and cluttered drawing. It is critical for engineers and designers to understand the basic principles of constructing and analyzing cross sections. Knowledge of these tools and commands will enable students to create more complex and accurate models, which in turn will improve the efficiency and quality of design. It should be noted that free student access to AutoCAD is guaranteed due to the availability of educational versions on the developer's website.

REFERENCES

1. Bovnegra L.V., Novikov F.V., Yakimov, O.O., Zhovtobriukh V.O. (2024) *Narysna heometriia navch. posib [Descriptive geometry]*. Dnipro : Lira [in Ukrainian].
2. Mykhailenko, V. Ye., Vanin, V. V., & Kovalov, S. M. (2003). *Inzhenerna ta kompiuterna hrafika: pidruch. dlia stud. vyshchych zakl. osvity [Engineering and computer graphics] / Za redaktsiieiu VE Mykhailenka. K.: Karavela.* [in Ukrainian].
3. Meyers, F. (2007). Engineering design graphics: Into the 21st century. *The Engineering Design Graphics Journal*, 71(3).

4. Nyemba, W. R. (2022). Computer Aided Design: Engineering Design and Modeling Using AutoCAD. CRC Press..
5. Fakhritdinovna, S. S. (2021). Efficiency of the Use of Graphic Programs (Autocad, Compass, Coreldraw) In Higher Technical Education. JournalNX, 7(03), 52-55.
6. AutoCAD. Support and learning. URL: <https://www.autodesk.com>.
7. Strelbitskyi V, Bovnegra L. (2025). Advantages of using AutoCAD in teaching engineering and graphic disciplines. Science and Technology Today. № 1(42). 975-983.
8. Roman, S., & Iryna, S. (2024). FEATURES OF USING COMPUTER GRAPHICS UNDER CONDITIONS OF DISTANCE LEARNING IN VOCATIONAL (VOCATIONAL AND TECHNICAL) EDUCATION INSTITUTIONS. In The 19th International scientific and practical conference “Creative business management and implementation of new ideas”(May 14–17, 2024) Tallinn, Estonia. International Science Group. 2024. 281 p. (p. 145).
9. Kakhramonovich, M. S. (2024). THE ESSENCE OF GRAPHIC COMPETENCE OF STUDENTS OF TECHNICAL UNIVERSITY IN THE CONDITIONS OF INFORMATIZATION OF EDUCATION. Journal of Advanced Scientific Research (ISSN: 0976-9595), 5(12).

Received 26.03.2025.

Accepted 28.03.2025.

Використання 3D типових тіл-примітивів САПР AutoCad до розв'язку позиційних задач нарисної геометрії

Графічна підготовка студентів технічних спеціальностей є основою інженерної освіти. Аналіз успішності з дисциплін «Нарисна геометрія» та «Інженерна графіка» виявив основну причину зниження результатів за останні роки - недостатність базових знань, набутих у школі. Для покращення засвоєння матеріалу та оптимізації навчального процесу необхідно впроваджувати інноваційні методи, які розвивають просторову уяву та професійні навички. У даній роботі продемонстровано використання комп'ютерної візуалізації для вивчення перерізів тривимірних тіл (конуса, сфери, циліндра) площиною в програмі AutoCAD. Такий підхід дозволяє краще підготувати майбутніх інженерів до розв'язування реальних задач. Простота побудови комп'ютерної моделі дозволяє студентам візуалізувати отримані об'єкти на січній площині, а також їх прямокутні проекції на основні площини.

Стрельбіцький Віктор Васильович – доцент, кандидат технічних наук, кафедра Підйомно-транспортні машини та інжиніринг портового технологічного обладнання, Одеський національний морський університет.

Strelbitskyi Viktor Vasylovych – PhD, associated professor, Hoisting and transport machines and engineering of port technological equipment, Odessa National Maritime University.

А.М. Клименко, Н.В. Карпенко, В.В. Герасимов

ШИФРУВАННЯ ТА РОЗШИФРУВАННЯ ДАНИХ У DATASTORE ДЛЯ БЕЗПЕЧНОГО ЛОКАЛЬНОГО ЗБЕРІГАННЯ

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена ризиками витоку конфіденційних даних у мобільних додатках. Розглянуто проблему відкритого зберігання даних у DataStore Android. Мета – забезпечити безпечне локальне збереження токенів через AES-шифрування (CBC, PKCS7). Підхід, запропонований у статті, запобігає несанкціонованому доступу, що підвищує безпеку чутливої інформації

Ключові слова: шифрування, DataStore, AES, безпека даних, Android, токени, конфіденційність.

Постановка проблеми. Локальне зберігання даних на мобільних пристроях є важливою складовою безпеки персональної та корпоративної інформації. Смартфони та планшети часто містять конфіденційні дані, такі як паролі, фінансові відомості, приватні повідомлення та робочі документи. Якщо ці дані недостатньо захищені, вони можуть стати ціллю для зловмисників, що загрожує як особистій, так і професійній безпеці користувача.

Основними ризиками локального зберігання є фізичний доступ до пристрою, злом операційної системи та витік даних через шкідливі програми. Недостатній рівень шифрування або слабкі паролі можуть зробити пристрій вразливим до атак. Тому сучасні операційні системи мобільних пристроїв пропонують такі засоби безпеки, як апаратне шифрування, біометричну автентифікацію та захищені середовища для збереження критичних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Android пропонує кілька варіантів зберігання даних:

- ✓ локальне сховище (Internal Storage) - доступне лише для самого додатка;
- ✓ зовнішнє сховище (External Storage) - раніше SD-карта, зараз - це спільне сховище на пристрої;
- ✓ спільні налаштування (SharedPreferences) - для зберігання пари ключ-значення;
- ✓ SQLite-база даних - для збереження структурованих даних;
- ✓ Keystore - для зберігання криптографічних ключів;
- ✓ хмарне сховище - дані можуть зберігатися на сервері.

У статті [1] запропоновано використання динамічного аналізу, який дозволяє виявити небезпечне зберігання даних у реальному часі, без потреби доступу до вихідного коду додатка. Автори цієї статті вказують на те, що Scoped Storage суттєво покращує

безпеку, але багато додатків обходяться без нього. Окрім цього, деякі додатки мають небезпечний доступ до системних файлів та зберігають чутливі дані у спільних папках, що створює ризики витоку інформації. Але у статті не розглянуто, чи використовують додатки шифрування для захисту чутливих даних, а також те, чи перевіряються ключі доступу до Keystore.

Автори статті [2] пропонують наступні рішення для захисту даних:

- фізичні рішення: CleanOS, TinMan, Sentry, Deadbolt, DroidVault та ARMOR (захист від RowHammer-атак);
- програмні рішення: використання Android Encryption Systems (FDE та KeyChain), біометричної автентифікації та хмарних технологій.
- вирішення проблем з впровадженням криптографічних API через помилки розробників.

Однак вплив шифрування на швидкодію додатків та автономність пристрою залишається поза їх увагою. Окрім цього, не розглянуть питання: «Чи використовують додатки належне шифрування?», «Чи достатньо захищений Keystore від компрометації?»

У статті [3] обговорюється важливість безпеки даних у сучасному цифровому світі та представлений інструмент для захисту чутливої інформації HashiCorp Vault. Він може шифрувати та розшифровувати дані без їх зберігання, що корисно для додатків, які потребують можливості шифрування без видачі ключів шифрування. Однією з його можливостей є безпечне управління обліковими даними баз даних, ключами API та SSH-сертифікатами. Однак стаття не містить практичних прикладів або сценаріїв впровадження HashiCorp Vault, що може ускладнити розуміння його застосування, а огляд функцій Vault є загальним і не заглиблюється в деталі реалізації або налаштування.

Деякі особливості налаштування Vault висвітлюються у [4], хоча автори також кажуть про те, що правильно налаштувати Vault для проектів зі складною структурою непросто і доведеться витратити чимало часу на правильне структурування і налаштування доступів та динамічних паролей.

Мета дослідження. Дослідити проблему відкритого зберігання даних у сховищі Data Store Android-додатків та запропонувати метод безпечного зберігання чутливої інформації на прикладі токенів доступу.

Викладення основного матеріалу дослідження. У сучасних Android-додатках активно використовують локальне зберігання даних. Data Store є сучасним та ефективним рішенням для цього, оскільки зберігає локальні дані у вигляді пари ключ-значення. Однак Data Store зберігає дані у відкритому вигляді, тобто користувач або шкідливе програмне забезпечення можуть їх зчитати.

Якщо зберігається нечутлива інформація, наприклад, чи хоче користувач отримувати повідомлення або чи увімкнений темний режим екрану, — це не є проблемою. Проте, якщо ми зберігатимемо токен, за допомогою якого користувач виконуватиме запити до API, можуть виникнути проблеми. Зловмисне програмне забезпечення може використовувати цей токен для надсилання запитів до сервера від імені користувача.

Це може призвести до додаткових витрат на обслуговування сервера та створити ризики витоку конфіденційних даних користувача.

Для шифрування даних на мовах Java/Kotlin є пакет `javax.crypto`. Цей пакет надає класи та інтерфейси для криптографічних операцій. Криптографічні операції, визначені у цьому пакеті, включають шифрування, генерацію ключів і узгодження ключів, а також генерацію коду автентифікації повідомлень (MAC). Підтримка шифрування включає симетричні, асиметричні, блокові та потокові шифри. Цей пакет також підтримує захищені потоки і запечатані об'єкти [5].

Jetpack DataStore — це рішення для зберігання даних, яке дозволяє зберігати пари ключ-значення або типізовані об'єкти за допомогою буферів протоколу. DataStore використовує Kotlin-корутини та Flow для асинхронного, послідовного та транзакційного зберігання даних [6].

Для шифрування даних було обрано симетричний блочний алгоритм AES, однією з перевагою якого є змінна довжина ключа. Симетричні ключі можуть мати довжину 128, 192 або 256 біт. Чим довший ключ, тим складніше його зламати [7].

Алгоритм AES використовує Cipher Block Chaining (CBC) та PKCS7 Padding, оскільки він працює з блоками фіксованого розміру і потребує заповнення останнього блоку перед шифруванням.

Режим CBC — це типовий режим роботи алгоритму блочного шифрування, який забезпечує можливість обробки даних за стандартом шифрування даних (DES) і розширеним стандартом шифрування (AES), при чому довжина шифру для DES повинна становити 64 біти, а для AES відповідно 128/192/256 біт. Потрібно звернути увагу на те, що в цьому режимі алгоритм працює з блоками фіксованого розміру (64 або 128 біт для одного блоку), але в реальному світі текст має різну довжину. Тому останній блок тексту, що шифрується або дешифрується, повинен бути збільшений до 128 біт [8].

Завдяки використанню режиму CBC кожен блок шифротексту залежить не тільки від відповідного відкритого тексту, а й від попереднього зашифрованого блоку. Це робить шифрування стійким до повторень однакових блоків та гарантує, що навіть невелика зміна у відкритому тексті призведе до кардинальної зміни у вихідному шифротексті. Оскільки CBC використовує ініціалізаційний вектор (iv), він додає певну випадковість до процесу шифрування і запобігає атакам на повторювані шаблони в даних.

Доповнення даних (Padding) застосовується перед шифруванням, коли це ключове слово вказується за допомогою виклику служби `Symmetric Algorithm Encipher`, і видаляється з розшифрованих даних, коли це ключове слово вказується за допомогою виклику служби `Symmetric Algorithm Decipher` [9]. Тобто перед шифруванням текст "вирівнюється" по межі в 128 біт, а після розшифрування цей "вирівнюючий" текст видаляється з вже розшифрованих даних.

Правила заповнення PKCS дуже прості:

1. Байти заповнення завжди додаються до відкритого тексту перед його шифруванням.

2. Кожен байт заповнення має значення, що дорівнює загальній кількості байт заповнення, які додаються. Наприклад, якщо потрібно додати 6 байт вирівнювання, кожен з цих байтів матиме значення 0x06.

3. Загальна кількість байтів заповнення принаймні дорівнює одиниці, і це кількість, яка необхідна для того, щоб довести довжину даних до розміру, кратного розміру блоку алгоритму шифрування [9].

Щоб реалізувати шифрування та розшифрування, потрібно спочатку створити константи, в яких задаємо алгоритм шифрування, режим блочного шифрування, схему доповнення, щоб дані відповідали вимогам алгоритму, а також поле, яке об'єднує ці параметри, та ім'я ключа, під яким він буде зберігатися.

Приклад констант:

```
private const val KEY_ALIAS = "secret"
private const val ALGORITHM = KeyProperties.KEY_ALGORITHM_AES
private const val BLOCK_MODE = KeyProperties.BLOCK_MODE_CBC
private const val PADDING = KeyProperties.ENCRYPTION_PADDING_PKCS7
private const val TRANSFORMATION = "$ALGORITHM/$BLOCK_MODE/$PADDING"
```

Далі потрібно ініціалізувати cipher (об'єкт для шифрування/розшифрування, який використовує попередньо визначену трансформацію) та keyStore (об'єкт, який працює з AndroidKeyStore — місцем для зберігання ключів, забезпечуючи їхню безпеку).

Приклад ініціалізації:

```
private val cipher = Cipher.getInstance(TRANSFORMATION)
private val keyStore = KeyStore.getInstance("AndroidKeyStore").apply {
    load(null) }
```

Оскільки доступ до даних відбувається через ключ, потрібно створити методи для його отримання або створення.

```
private fun getKey(): SecretKey {
    val existingKey = keyStore.getEntry(KEY_ALIAS, null) as? KeyStore.SecretKeyEntry
    return existingKey?.secretKey ?: createKey() }
```

```
private fun createKey(): SecretKey {
    return KeyGenerator
        .getInstance(ALGORITHM)
        .apply {
            init(
                KeyGenParameterSpec.Builder(
                    KEY_ALIAS,
                    KeyProperties.PURPOSE_ENCRYPT or
                    KeyProperties.PURPOSE_DECRYPT)
                    .setBlockModes(BLOCK_MODE)
                    .setEncryptionPadding(PADDING)
                    .setRandomizedEncryptionRequired(true)
                    .build()
            )
        }
```

```
    )}
```

```
    .generateKey() }
```

BLOCK_MODE та PADDING — для встановлення блочного режиму та доповнення. Останній крок — це створення методів шифрування та розшифрування. Приклад методів:

```
    fun encrypt(bytes: ByteArray): ByteArray {
        // Ініціалізація шифрувальника в режимі ENCRYPT_MODE
        cipher.init(Cipher.ENCRYPT_MODE, getKey())
        // Отримання ініціалізаційного вектора (iv)
        val iv = cipher.iv
        // Шифрування вхідних байтів
        val encrypted = cipher.doFinal(bytes)
        // Повернення iv разом із зашифрованими даними
        return iv + encrypted
    }
```

```
    fun decrypt(bytes: ByteArray): ByteArray {
        // Витягуємо iv із зашифрованих даних
        val iv = bytes.copyOfRange(0, cipher.blockSize)
        // Отримуємо зашифровану частину
        val data = bytes.copyOfRange(cipher.blockSize, bytes.size)
        // Ініціалізація розшифрувальника
        cipher.init(Cipher.DECRYPT_MODE, getKey(), IvParameterSpec(iv))
        return cipher.doFinal(data) // Розшифрування даних
    }
```

Методи `encrypt` і `decrypt` використовуються в `UserPreferencesSerializer` для шифрування та розшифрування даних перед їх збереженням у `Data Store`.

```
    @Serializable
    data class UserPreferences(
        val token: String? = null
    )
```

```
object UserPreferencesSerializer : Serializer<UserPreferences> {
    override val defaultValue: UserPreferences
        get() = UserPreferences()
}
```

```
    override suspend fun readFrom(input: InputStream): UserPreferences {
        val encryptedBytes = withContext(Dispatchers.IO) {
            input.use { it.readBytes() }
        }
        val encryptedBytesDecoded =
            Base64.getDecoder().decode(encryptedBytes)
        val decryptedBytes = Crypto.decrypt(encryptedBytesDecoded)
        val decodedJsonString = decryptedBytes.decodeToString()
        return Json.decodeFromString(decodedJsonString)
    }
```

```
override suspend fun writeTo(t: UserPreferences, output: Out-
putStream) {
    val json = Json.encodeToString(t)
    val bytes = json.toByteArray()
    val encryptedBytes = Crypto.encrypt(bytes)
    val encryptedBytesBase64 =
Base64.getEncoder().encode(encryptedBytes)
    withContext(Dispatchers.IO) {
        output.use {
            it.write(encryptedBytesBase64)
        }
    }
}
```

Метод **readFrom(input: InputStream)** відповідає за зчитування збережених у DataStore даних, їх декодування та перетворення у об'єкт UserPreferences. Спочатку він читає вхідні зашифровані байти та декодує їх з рядку в кодуванні Base64. Далі отримані дані розшифровуються за допомогою Crypto.decrypt(), після чого отримані байти перетворюються у JSON-рядок. Нарешті, цей рядок десеріалізується у UserPreferences за допомогою Json.decodeFromString(), і отриманий об'єкт повертається.

Метод **writeTo(t: UserPreferences, output: OutputStream)** виконує зворотню операцію - бере об'єкт UserPreferences, перетворює його у JSON-рядок та шифрує перед збереженням у DataStore. Спочатку об'єкт серіалізується у JSON через Json.encodeToString(t), потім конвертується у масив байтів. Отримані байти шифруються за допомогою Crypto.encrypt(), після чого байти даних кодується в рядок в кодуванні Base64, який записується до output, щоб бути збереженим у DataStore (рис. 1).

Для демонстрації працездатності коду створимо інтерфейс із двома кнопками та текстовим полем, яке виводитиме декодовані дані з Data Store (рис. 2).

```
private val Context.dataStore by dataStore(
    fileName = "user-preferences",
    serializer = UserPreferencesSerializer
)

private val token = "some token"

class MainActivity : ComponentActivity() {
    override fun onCreate(savedInstanceState: Bundle?) {
        super.onCreate(savedInstanceState)
        enableEdgeToEdge()
        setContent {
            EncryptedDataStoreTheme {
                Scaffold(modifier = Modifier.fillMaxSize()) {
innerPadding ->
                    Column(
                        modifier = Modifier
                            .padding(innerPadding)
                    ) {
```



```
val scope = rememberCoroutineScope()
var text by remember {mutableS-
tateOf("")}

Button(
    onClick = {
        scope.launch {
            datastore.updateData {
                UserPreferences(
                    token = token
                ) }}}
    ) {
    Text("Encrypt")
}
Button(
    onClick = {
        scope.launch {
            text = dataS-
tore.data.first().token ?: ""
        }
    ) {
    Text("Decrypt")
}
Text(
    text = text
) } } } } }
```

Тепер у змінній token зберігатимемо рядок “some token”.

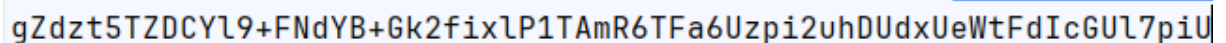


Рисунок 1 – Вигляд шифрованого тексту у Data Store файлі

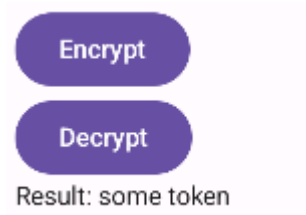


Рисунок 2 - Вигляд розшифрованого тексту на екрані мобільного додатку

Висновки. Шифрування даних у Android-додатках є важливим елементом безпечного локального зберігання інформації. Використання Data Store для збереження чутливих даних, таких як токени, вимагає застосування шифрування для захисту їх від несанкціонованого доступу. Рішення, яке передбачає використання AES алгоритму з режимом CBC та схемою доповнення PKCS7, дозволяє забезпечити належний рівень безпеки та запобігти потенційним загрозам з боку злоумисників.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kris Heid, Tobias Tefke, Jens Heider and Ralf C. Staudemeyer. Android Data Storage Locations and What App Developers Do with It from a Security and Privacy Perspective. / Proceedings of the 8th International Conference on Information Systems Security and Privacy ICISSP. – 2022. – Volume 1. – pp. 378-387. DOI: 10.5220/0010838200003120
2. Haya Altuwajri, Sanaa Ghouzali. Android data storage security: A review. / Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences. – 2018. – 32(5). DOI: 10.1016/j.jksuci.2018.07.004
3. Myroslav Kyselytsia. Зaxист ваших секретів: Глибоке дослідження HashiCorp Vault. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dou.ua/forums/topic/46007/>
4. Скок М., Герасимов В. Технологія Vault від HashiCorp для зберігання та захисту паролів та токенів доступу. / VII Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем" (MEICS-2022), м. Дніпро, ДНУ ім. О. Гончара, 23-25 листопада 2022 р., с. 66-67. <http://meics.dnure.dp.ua/files/MEICS-2022.pdf>
5. Package javax.crypto [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs.oracle.com/javase/8/docs/api/javax/crypto/package-summary.html>
6. DataStore [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://developer.android.com/topic/libraries/architecture/datastore>
7. What is AES Encryption and why is it important? [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://winzip.com/blog/enterprise/aes-encryption-explained/?srsltid=AfmBOorBsgzMt91e9tSB1cHpKOi8taud8u7IpmniFkhiDKHMgQ1D304I>
8. CBC Mode [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://xilinx.github.io/Vitis_Libraries/security/2020.1/guide_L1/internals/cbc.html#overview
9. PKCS padding method [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ibm.com/docs/en/zos/3.1.0?topic=rules-pkcs-padding-method>

REFERENCES

1. Kris Heid, Tobias Tefke, Jens Heider and Ralf C. Staudemeyer. Android Data Storage Locations and What App Developers Do with It from a Security and Privacy Perspective. / Proceedings of the 8th International Conference on Information Systems Security and Privacy ICISSP. – 2022. – Volume 1. – pp. 378-387. DOI: 10.5220/0010838200003120
2. Haya Altuwajri, Sanaa Ghouzali. Android data storage security: A review. / Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences. – 2018. – 32(5). DOI: 10.1016/j.jksuci.2018.07.004
3. Myroslav Kyselytsia. Zakhyst vashykh sekretiv: Hlyboke doslidzhennia HashiCorp Vault. <https://dou.ua/forums/topic/46007/>
4. Skok M., Gerasymov V. Tekhnolohiia Vault vid HashiCorp dlia zberihannia ta zakhystu paroliv ta tokeniv dostupu. / VII Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia "Perspektyvni napriamky su-chasnoi elektroniky, informatsiinykh i kompiuternykh system" (MEICS-2022), m. Dnipro, DNU im. O. Honchara, 23-25 november 2022. – p. 66-67. <http://meics.dnure.dp.ua/files/MEICS-2022.pdf>

5. Package javax.crypto <https://docs.oracle.com/javase/8/docs/api/javax/crypto/package-summary.html>
6. DataStore <https://developer.android.com/topic/libraries/architecture/datastore>
7. What is AES Encryption and why is it important? <https://winzip.com/blog/enterprise/aes-encryption-explained/?srsltid=AfmBOorBsgzMt91e9tSB1cHpKOi8taud8u7IpmniFkhiDKHMgQ1D304I>
8. CBC Mode https://xilinx.github.io/Vitis_Libraries/security/2020.1/guide_L1/internals/cbc.html#overview
9. PKCS padding method <https://www.ibm.com/docs/en/zos/3.1.0?topic=rules-pkcs-padding-method>

Received 26.03.2025.

Accepted 28.03.2025.

Encryption and Decryption of Data in DataStore for Secure Local Storage

The relevance of this study is determined by the growing threats of data leakage in mobile applications, where sensitive user information such as tokens, passwords, and API keys are often stored insecurely. Local storage on Android devices remains a critical aspect of application security, as improper handling of sensitive data can lead to unauthorized access, data breaches, and financial or reputational damage. This research focuses on addressing the problem of insecure storage within Android's DataStore and proposes a secure encryption-based approach to mitigate risks.

The problem statement highlights that DataStore, a modern and efficient key-value storage solution for Android applications, lacks built-in encryption mechanisms, leaving sensitive information vulnerable to unauthorized access. While DataStore provides an efficient and structured way to store small amounts of persistent data asynchronously, its default implementation does not offer protection against potential data exposure in case of device compromise or malware attacks. This raises the need for additional security measures to ensure that confidential information, such as authentication tokens, remains protected.

The objective of this research is to develop and implement a secure method for encrypting sensitive data stored in DataStore. The goal is to integrate an effective encryption mechanism that enhances data security without compromising performance or usability in Android applications. The study focuses on AES encryption (Advanced Encryption Standard) using Cipher Block Chaining (CBC) mode with PKCS7 padding to ensure strong protection against unauthorized access. AES encryption is widely recognized for its robustness, and the chosen configuration enhances security by introducing randomization and integrity checks.

The methodology involves an in-depth analysis of existing Android storage mechanisms, a comparative evaluation of encryption techniques, and the development of an encryption layer integrated with DataStore. The proposed encryption scheme was implemented using javax.crypto libraries, ensuring compatibility with modern Android security best practices. The research also examines the impact of encryption on application performance, assessing factors such as processing time, storage efficiency, and integration complexity.

The results demonstrate that incorporating AES encryption significantly improves the security of sensitive data in DataStore without introducing substantial performance overhead. The experimental implementation confirms that encrypted tokens stored in DataStore remain

protected from unauthorized extraction, even in cases where an attacker gains access to the file system. Additionally, the research highlights the importance of proper key management, advocating the use of Android Keystore for securely generating and storing encryption keys.

Key conclusions drawn from the study emphasize that encryption is essential for preventing unauthorized access to sensitive data stored in DataStore. The implementation of AES-CBC encryption with PKCS7 padding effectively enhances security while maintaining efficiency. Future research directions include exploring more advanced encryption modes, such as AES-GCM, and evaluating their performance trade-offs in real-world applications. The study also recommends further research on user authentication mechanisms to complement data encryption and strengthen overall application security.

Keywords: encryption, DataStore, AES, data security, Android, tokens, privacy.

Клименко Артем Максимович – студент 4 курсу кафедри електронних обчислювальних машин ДНУ ім. Олесь Гончара, м. Дніпро.

Карпенко Надія Валеріївна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин ДНУ ім. Олесь Гончара.

Герасимов Володимир Володимирович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій ДНУ ім. Олесь Гончара.

Klymenko Artem – 4th year student of the Department of Electronic Computing, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro.

Karpenko Nadiya – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Electronic Computing, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro.

Gerasimov Volodymyr – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Science and Information Technologies, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro.

В. Стьопкін, В. Радченко, О. Ровенський,
А. Єрофєєва, В. Піліпенко, В. Прихно

КОНТРОЛЬ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Анотація. Метою роботи Метою дослідження є комплексний аналіз проблем якості електроенергії (PQ) в мережах промислових підприємств, а також розробка та систематизація методів контролю, діагностики і покращення основних PQ-параметрів, таких як гармонічні спотворення, флікер, провали напруги, несиметрія фаз і реактивна потужність.

Методика. У роботі використано поєднання теоретичного аналізу, огляду стандартів (IEC 61000-4-30, EN 50160, IEEE 519) та практичного досвіду впровадження сучасних цифрових аналізаторів PQ. Проаналізовано застосування фільтрів, компенсаторів та інтелектуальних систем, зокрема DVR, STATCOM, гібридних активних фільтрів, а також машинного навчання для класифікації PQ-подій.

Результати. У ході дослідження охарактеризовано основні показники PQ, наведено методи їх вимірювання, діагностики та компенсації. Представлено приклади впровадження технічних рішень для покращення якості енергії, зокрема: пасивні та активні фільтри гармонік, SVC і STATCOM для боротьби з флікером, методи зниження несиметрії та захисту від короткочасних порушень живлення.

Наукова новизна. Запропоновано концепцію розподіленої компенсації якості електроенергії із використанням можливостей смарт-інверторів та зарядних станцій. Розглянуто застосування нейромереж та S-перетворень для ідентифікації джерел збурень у режимі реального часу. Обґрунтовано переваги інтегрованих підходів до локальної та централізованої корекції PQ.

Практичне значення. Результати можуть бути використані інженерами з енергоменеджменту та персоналом підприємств для побудови систем моніторингу, захисту критичного обладнання та підвищення енергоефективності. Запропоновані рішення зменшують аварійність, втрати енергії та витрати на обслуговування, забезпечуючи відповідність сучасним стандартам сталого розвитку.

Ключові слова: якість електроенергії, PQ-норми, стандарти IEEE, EN 50160, гармонічні спотворення, флікер, розподілена генерація, мікромережі, компенсація, енергетичні стандарти.

Вступ. Стабільне та якісне електропостачання є одним із ключових чинників ефективної роботи промислових підприємств у сучасних умовах технічного прогресу та цифрової трансформації. Залежність критичного технологічного обладнання від

стабільних параметрів електроенергії стрімко зростає, що робить забезпечення відповідного рівня якості електроенергії (Power Quality, PQ) стратегічно важливим завданням для інженерів, енергетиків та операторів мереж. В умовах зростання чутливості електроспоживачів до збурень, поширення високочастотної електроніки, широкого використання електроприводів та перетворювальної техніки, відхилення параметрів живлення навіть у межах кількох відсотків можуть спричинити суттєві наслідки - від збоїв у роботі автоматизованих ліній до пошкодження електроніки та аварійного простою виробництва.

Якість електроенергії визначається сукупністю параметрів, зокрема: стабільністю частоти та напруги, симетрією фаз, відсутністю провалів і перенапруг, низьким рівнем флікеру, гармонічних та міжгармонічних спотворень. Кожен із цих показників має нормативно визначені межі, недотримання яких може призвести до погіршення роботи обладнання, втрати енергоефективності та підвищення витрат на обслуговування. Особливо гостро питання PQ стоїть у таких галузях, як металургія, хімічна промисловість, мікроелектроніка, фармацевтика та інші сфери, де процеси є неперервними та вимагають високого рівня електротехнічної надійності.

Відповіддю на виклики сучасного енергоспоживання стало впровадження технологій постійного моніторингу PQ. Завдяки цифровим аналізаторам, що відповідають стандартам IEC 61000-4-30 [1], з'явилася можливість із високою точністю та частотою вимірювати параметри живлення у вузлових точках мережі та безпосередньо на відповідальних споживачах. Аналіз зібраних даних дозволяє не лише фіксувати відхилення, але й досліджувати їх динаміку, виявляти періодичність, джерела збурень та потенційні ризики. На основі статистичних показників, таких як SAIFI, SAIDI, рівні THD, флікер-індекси та ін., формуються рішення для корекції параметрів та підвищення загальної надійності мережі.

Окрім збору інформації, важливим завданням є її інтерпретація. Сучасні методи обробки сигналів — вейвлет-перетворення, коротке перетворення Фур'є, S-перетворення — у поєднанні з алгоритмами машинного навчання дозволяють в реальному часі класифікувати PQ-події та локалізувати їх джерела. Застосування штучного інтелекту та нейронних мереж відкриває нові можливості для автоматичного виявлення характеру порушень, таких як провали напруги, імпульси, гармонічні спотворення, та для формування рекомендацій щодо відповідних заходів реагування.

Втім, одного лише контролю недостатньо для забезпечення належного рівня якості. Комплексна система управління PQ передбачає також реалізацію технічних рішень на різних рівнях: від компенсації реактивної потужності та гармонік до встановлення динамічних відновлювачів напруги, систем безперебійного живлення, стабілізаторів фази та мережевих регуляторів. Із розвитком концепції Smart Grid та мікромереж, дедалі більше функцій щодо підтримки якості передається на рівень локальних енергоактивних пристроїв — сонячних інверторів, електромобільних зарядних станцій, гібридних фільтрів тощо. Така децентралізована модель управління

якістю дозволяє оперативно й ефективно реагувати на змінні навантаження та відхилення параметрів.

Отже, актуальність теми забезпечення якості електроенергії зумовлена як технічними, так і економічними факторами. Підвищення якості електропостачання сприяє не лише зменшенню ризиків і витрат, але й підвищенню загальної енергоефективності підприємства, а також відповідності сучасним стандартам сталого розвитку. У цьому контексті дана стаття має на меті здійснити комплексний огляд підходів, методів і засобів контролю, аналізу та покращення якості електроенергії в мережах промислових підприємств, з урахуванням як класичних технічних рішень, так і новітніх інтелектуальних технологій.

1. Показники якості електроенергії. До основних показників якості електроенергії, що нормуються міжнародними та національними стандартами (зокрема ІЕС 61000-4-30, EN 50160, IEEE 519) [1-6], належать: відхилення частоти мережі; відхилення напруги від номінального значення (довготривалі перенапруги або недонапруги); флікери (повільні коливання напруги, що сприймаються зором як мерехтіння освітлення); короткочасні провали та підвищення напруги; несинусоїдальність напруги (гармонічні викривлення); несиметрія напруги у трифазній системі; короткочасні перенапруги та імпульсні перешкоди.

Відхилення частоти мережі (Δf_{net}):

$$\Delta f_{net} = f_{meas} - f_{nom}, \quad (1)$$

де f_{meas} – виміряна фактична частота (Hz), f_{nom} – номінальна частота (зазвичай 50 або 60 Гц). Частотні відхилення можуть свідчити про дисбаланс між генерацією і споживанням у системі.

Відхилення напруги (довготривалі перенапруги або недонапруги) ΔU_{rel} :

$$\Delta U_{rel} = \left(\frac{U_{meas} - U_{nom}}{U_{nom}} \right) \times 100\%, \quad (2)$$

де U_{meas} – виміряне середнє значення напруги, U_{nom} – номінальне значення (230 В для фази або 400 В для лінії). Перевищення $\pm 10\%$ може вважатися відхиленням за межами норми.

Флікери P_{lt} (освітлювальне мерехтіння):

$$P_{lt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{st}^{(i)})^2}, \quad (3)$$

де $P_{st}^{(i)}$ – короткочасний флікер, виміряний протягом i -го 10-хвилинного інтервалу, N – кількість таких інтервалів (зазвичай 12 за годину).

Значення $P_{It} > 1.0$ вважається надмірним і викликає дискомфорт зорового сприйняття.

Короткочасні провали та підвищення напруги $D_{voltage}$:

$$D_{voltage} = \left(\frac{U_{nom} - U_{min}}{U_{nom}} \right) \times 100\%, \quad (4)$$

де U_{min} — мінімальне значення напруги під час події. Короткочасний провал триває від 10 мс до 1 хв і може викликати збій електронного обладнання.

Гармонічні викривлення (Total Harmonic Distortion) THD_U :

$$THD_U = \sqrt{\sum_{n=2}^N \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2} \times 100\%, \quad (5)$$

де U_1 — амплітуда основної (1-ї) гармоніки, U_n — амплітуди n-ї гармоніки, N — загальна кількість врахованих гармонік (зазвичай до 50). Високий THD спричиняє перегрів двигунів, хибну роботу перетворювачів та релейного захисту.

Несиметрія напруги (Voltage Unbalance Factor) VUF :

$$VUF = \frac{U_{negative}}{U_{positive}} \times 100\%, \quad (6)$$

де $U_{negative}$ та $U_{positive}$ — амплітуди відповідно негативної і позитивної послідовностей напруги в симетричному перетворенні. Несиметрія понад 2% вважається загрозовою для трифазних двигунів.

Короткочасні перенапруги та імпульсні перешкоди S_{imp} :

$$S_{imp} = \left(\frac{U_{peak} - U_{nom}}{U_{nom}} \right) \times 100\%, \quad (7)$$

де U_{peak} — амплітуда перенапруги. Ці події тривають мікросекунди-милісекунди, але можуть викликати вихід з ладу чутливого обладнання.

2. Моніторинг та діагностика PQ. Першочерговим кроком для покращення якості електроенергії є впровадження систем постійного моніторингу параметрів. Сучасні цифрові аналізатори якості електроенергії класу А (відповідно до ІЕС 61000-4-30) дозволяють з високою точністю вимірювати всі основні показники PQ – від частоти та напруги до показників флікеру та спектру гармонік [7]. Такі пристрої встановлюються як у вузлових точках мережі (на підстанціях), так і на найбільш відповідальних споживачах. Звіти моніторингу дозволяють виявити, які саме показники виходять за межі норми, у який час і з якою періодичністю. Для аналізу подій (провалів, імпульсів) застосовуються реєстратори швидких перехідних процесів. На

основі великого масиву даних вимірювань можливе статистичне оцінювання якості – наприклад, розрахунок показників SAIFI, SAIDI (середня частота та тривалість перерв) для надійності живлення або визначення 95-перцентилію відносного коливання напруги тощо. Енергокомпанії впроваджують автоматизовані системи обліку та моніторингу (AMI), які інтегрують функції вимірювання PQ у інтелектуальні лічильники та датчики. Таким чином, створюється основа для проактивного управління якістю: оператор мережі отримує сигнал про наближення параметра до граничного рівня і може вжити заходів (наприклад, переключити навантаження, ввімкнути компенсацію тощо) до того, як виникне аварійна ситуація або скарги споживачів.

Окрім постійного моніторингу, велика увага приділяється методам ідентифікації та класифікації PQ-подій в режимі реального часу. Це потрібно, щоб автоматично розпізнавати, який тип порушення стався (наприклад, провал чи імпульс, одиночний чи комбінований) і що його ймовірно спричинило. Сучасні алгоритми використовують трансформації сигналів (вейвлет-перетворення, S-перетворення, коротке Фур'є) для виокремлення ознак збурень, а далі застосовують класифікатори – нейронні мережі, машини опорних векторів (SVM), дерева прийняття рішень тощо [8, 9]. Наприклад, у роботі [9] представлено підхід, де спочатку виконується S-трансформування осцилограми напруги, а отримана матриця час-частота обробляється згортковою нейромережею для автоматичного розпізнавання типу порушення (саг, свел, гармоніка, комбінації) з точністю понад 98% [9]. Такі технології особливо корисні в складних умовах Smart Grid, коли одночасно можуть мати місце кілька видів PQ-відхилень. Більше того, системи визначення джерела збурень (source detection) аналізують взаємодію напруги та струму у вузлі мережі: якщо під час збурення величина струму навантаження зросла одночасно з падінням напруги, то, ймовірно, саме даний споживач спричинив просідання (наприклад, ввімкнувся двигун); якщо ж струм впав разом з напругою – причина поза даним вузлом (наприклад, зовнішнє КЗ) [10]. Такі програмні засоби наразі впроваджуються в рамках концепції “цифрового підстанційного контролера PQ”.

3. Компенсація провалів і перерв живлення. Короткочасні провали напруги є одним з найскладніших для повної компенсації типів PQ-подій, адже часто обумовлені зовнішніми аваріями. Проте існують технічні рішення, що дозволяють зменшити їхній вплив на критичних споживачів. Одним з найефективніших пристроїв є динамічний відновлювач напруги (DVR) – силовий перетворювач, який вмикається послідовно з навантаженням і в момент просадки напруги генерує додатковий різницевий сигнал, “підтягуючи” напругу на критичному обладнанні до номінального рівня [11]. DVR зазвичай містить накопичувач енергії (батарею або суперконденсатор), з якого черпається потужність під час провалу. Іншим підходом є джерела безперебійного живлення (UPS) динамічного типу: маховикові або суперконденсаторні системи, що здатні за кілька мілісекунд підключитися замість мережі і забезпечити живлення споживача протягом десятків секунд. Такі системи встановлюються на особливо чутливих споживачах (центри обробки даних, медичне обладнання, виробничі лінії з неперервним циклом). Для менш відповідальних навантажень застосовують реле

автоматичного перемикачання джерел (АТС): якщо основне джерело зникло або напруга впала нижче допустимого рівня, спрацьовує перемикач на резервну лінію чи резервний генератор. Хоч це не запобігає самому провалу, але скорочує тривалість перерви живлення. Для зниження частоти провалів, спричинених перевантаженнями при пусках двигунів, доцільно використовувати пускачі з плавним пуском або перетворювачі частоти для великих моторів – це знижує величину кидка струму i , відповідно, глибину просадки напруги. В електричних мережах промислових підприємств часто встановлюються статичні компенсатори VAR (STATCOM/SVC) із функцією підтримання напруги: вони віддають реактивну потужність у мережу під час провалу, допомагаючи підняти рівень напруги швидше [12]. Проте можливості таких пристроїв обмежені – при глибокому провалі через зовнішнє КЗ повністю відновити напругу локальними засобами важко. Тут в дію вступають швидкодіючі захисти: чим швидше відключиться аварійна ділянка, тим коротшим буде провал для решти мережі. Отже, селективна та швидка дія релейного захисту також важлива для мінімізації наслідків PQ-подій.

4. Зниження гармонічних спотворень. Для боротьби з несинусоїдальністю напруги використовують як пасивні, так і активні фільтрувальні засоби. Пасивні фільтри гармонік – це настроєні L-C контури, підключені паралельно до мережі, які створюють низький імпеданс на частоті певної гармоніки і відводять гармонійний струм у землю, не даючи йому поширюватися в мережу [13,14]. Такі фільтри часто встановлюються на промислових підприємствах з великими випрямлячами (наприклад, металургійні заводи) для 5, 7, 11 гармонік. Перевагою є відносна простота і дешевизна, але пасивні фільтри мають фіксовану компенсаційну характеристику і можуть потрапити в резонанс з мережею, якщо неправильно спроектовані. Більш досконалими є активні фільтри (APF) – силові перетворювачі (зазвичай на базі транзисторів), які підключаються паралельно до мережі і генерують в протифазі гармонічні струми, компенсуючи таким чином спотворення від нелінійних навантажень [14, 15]. Активний фільтр вимірює струм навантаження, виділяє його гармонічну складову і формує зворотний сигнал, який вводиться в мережу – в результаті сумарний струм у мережі стає близьким до синусоїди. APF може динамічно налаштовуватися під змінний спектр гармонік і одночасно компенсувати реактивну потужність. В огляді Ali et al. (2018) показано, що для ефективної роботи декількох пасивних фільтрів у мережі потрібні узгоджені алгоритми розподілу реактивної потужності між ними, аби уникнути перевантаження окремих фільтрів та забезпечити оптимальне зниження THD [15]. Активні фільтри позбавлені цих недоліків, однак є дорогими. На практиці застосовують гібридні фільтри – комбінацію пасивних і малопотужного активного фільтра, що дозволяє економити потужність електроніки. Окрім паралельних фільтрів, використовуються серійні активні фільтри [13], які включаються послідовно в лінію і згладжують гармоніки напруги, проте вони рідше застосовуються через потребу нести повний струм навантаження. В контексті гармонік перспективним є підхід “розподіленої компенсації”: наприклад, d [16] запропонували залучати інвертори

розподілених генераторів (сонячних батарей, батарей накопичення) для одночасної фільтрації гармонік у мікромережі. Цей підхід означає, що кожен джерело з інвертором може окрім основної функції виконувати роль локального активного фільтра для сусідніх нелінійних навантажень. Координація такої роботи здійснюється через спеціальні алгоритми, зокрема методи розподілу компенсаційного завдання між кількома інверторами (з урахуванням їх резерву потужності) [14]. Такий принцип узгоджується із сучасною концепцією гнучких мереж (smart inverters).

Крім фільтрів, для зменшення гармонік важливо обмежувати їх генерацію у джерелі. Нові стандарти (ІЕС 61000-3-2:2018) посилили вимоги до виробників побутової та офісної техніки щодо коефіцієнта нелінійних спотворень струму. Сучасні джерела живлення виконуються за топологією з корекцією коефіцієнта потужності (PFC), яка мінімізує вищі гармоніки. Таким чином, технологічний прогрес сприяє тому, що хоча абсолютна кількість нелінійних навантажень зростає, їх якість з точки зору гармонік підвищується. Тим не менш, у промислових установках із великими перетворювачами додаткові фільтри залишаються необхідними.

5. Компенсація реактивної потужності та флікера. Коливання напруги (флікер) та загальний рівень напруги тісно пов'язані з балансом реактивної потужності в мережі. Для покращення стабільності напруги застосовують стаціонарні батареї конденсаторів та реактори, які вмикаються/вимикаються автоматично за потреби. Однак такі ступінчасті компенсатори не здатні боротися з швидкими коливаннями (наприклад, від дугової печі, де зміни відбуваються кілька разів на секунду). В таких випадках ефективні динамічні компенсатори VAR – SVC та STATCOM. Традиційний SVC складається з тиристорних реакторів і конденсаторів, і може плавно змінювати генеровану/поглинаєму реактивну потужність протягом напівперіоду. Наприклад, на електросталеплавильних комбінатах SVC встановлюють безпосередньо на живлячих шинах печей: він відстежує миттєву реактивну потужність дуги і протидіє їй, згладжуючи коливання напруги [17,18]. Це дозволяє значно знизити флікер (на практиці – в 2-3 рази). Ще кращі показники має STATCOM на базі транзисторних інверторів: він здатен реагувати на зміни за декілька мілісекунд і генерувати реактивний струм з необхідною швидкісною характеристикою, незалежно від напруги мережі. STATCOMи успішно застосовуються для підтримки напруги у вітрових парках, компенсації флікеру від зварювальних машин, а також для швидкого гасіння несиметрії (за рахунок генерування негативної послідовності струму). В [19] автори продемонстрували, що використання керування STATCOMом на основі методів штучного інтелекту дозволяє одночасно поліпшити декілька показників PQ – зменшити і флікер, і гармоніки, і дисбаланс. Для боротьби з флікером також застосовуються електроприводи з регулюванням моменту дуги в печах, стабілізатори процесу, які згладжують коливання струму. Але основний підхід – саме мережеві компенсатори.

6. Усунення несиметрії. Як зазначалося, несиметрія виникає головним чином через однофазні навантаження. Отже, перший крок – раціональний розподіл однофазних споживачів по фазах мережі, щоб збалансувати струми. На промислових об'єктах встановлюють автостабілізатори балансу навантаження – контролери, що

автоматично перемикають частину однофазних навантажень між фазами при довготривалому дисбалансі. Для компенсації залишкової несиметрії та струмів нульової послідовності використовують рівномірно розподілені заземлення нейтралі та фільтри нульової послідовності (зазвичай це трифазні групи конденсаторів/реакторів, з'єднані у відкритий трикутник). У тягових підстанціях залізниць практикується включення балансуєчих трансформаторів або спеціальних схем (наприклад, схема Ле Блана), що перерозподіляють однофазне навантаження по трьох фазах рівномірніше [20]. В мікромережах з несиметрією можуть застосовуватися перетворювачі, які генерують потрібну негативну послідовність для її скасування (деякі сучасні ДСТАТКОМ можуть це робити). Загалом, підтримка симетрії – задача менш технологічно складна, ніж, скажімо, компенсація гармонік, і часто вирішується організаційно (правильним фазуванням).

7. Управління якістю в розподілених системах. Із розширенням мікромереж і Smart Grid виникає можливість гнучкіше керувати якістю на місцевому рівні. Наприклад, інвертори сонячних батарей можуть працювати за стратегією “Volt-VAr”, тобто при підвищенні напруги генерувати реактивну потужність (знижуючи напругу), а при зниженні – споживати (піднімаючи напругу). Це схоже на роботу STATCOM, але розподілено по багатьох малих джерелах. Таким чином, просунуті функції “розумних” інверторів дозволяють пом'якшити проблему перенапруги в денний час у мережах із великою генерацією на даху будинків. Аналогічно, масове підключення електромобілів може бути перетворене з проблеми на ресурс: зарядні станції з функцією двонаправленого живлення V2G теоретично можуть віддавати потужність у мережу при просіданні напруги або виступати як активні фільтри для гармонік. Хоча такі схеми ще в стадії досліджень, проте вони обговорюються у літературі [14]. Інший сучасний концепт – торгівля якістю електроенергії. В [21] автори запропонували “ринок гармонік” у мікромережі, де різні учасники (генератори чи споживачі з фільтрами) можуть пропонувати послуги з фільтрації гармонік за винагороду. Такий підхід стимулює економічно встановлення фільтрів там, де це потрібно, і дозволяє розподілити витрати на забезпечення PQ між усіма зацікавленими сторонами [22].

8. Управління якістю на стороні споживачів. Користувачі електроенергії, особливо промислові, теж вживають заходів для захисту свого обладнання і зниження негативного впливу на мережу. Окрім вже згаданих фільтрів і джерел безперебійного живлення, великі підприємства впроваджують системи енергетичного менеджменту, які контролюють графіки навантаження, щоб уникати раптових стрибків. Наприклад, розподіл пусків двигунів у часі (пуск не всіх одночасно, а по черзі) зменшує максимальні провали. Використання пристроїв плавного пуску (Soft Starter) істотно знижує кидки струму, хоч і подовжує розгін. Для зниження гармонік від перетворювачів частоти виробники часто інтегрують у них фільтри гармонік або активні фронт-енд модулі – це дозволяє виконати норматив IEEE 519 навіть без додаткових зовнішніх фільтрів. Якщо обладнання дуже чутливе до навіть невеликих відхилень напруги (наприклад, деякі медичні прилади, високоточні верстати з ЧПУ),

встановлюються локальні стабілізатори напруги або регулятори напруги швидкої дії на місці споживача. Вони підтримують вихідну напругу стабільною при зміні вхідної в діапазоні, скажімо, $\pm 15\%$. Хоча це не впливає на напругу у всій мережі, але захищає конкретний критичний процес від збою.

Отже, арсенал засобів контролю та покращення якості електроенергії є доволі широким. На рівні мережі оператори використовують компенсатори реактивної потужності, фільтри гармонік, регулятори напруги та резервні схеми живлення. На рівні споживачів – фільтри, пристрої захисту від провалів (UPS, DVR), засоби плавного пуску та балансування навантаження. Інтелектуальні мережі відкривають можливості розподіленого управління якістю: інтеграції функцій компенсації в самі розподілені джерела, створення локальних сервісів PQ (Quality as a Service). Важливою є і регуляторна сторона: стимули і тарифи, які заохочують споживачів не перевищувати встановлені ліміти за показниками якості. Приміром, у деяких контрактах за перевищення допустимого викиду гармонік або викликання провалу напруги можуть накладатися штрафи на споживача-“забруднювача”. Такий підхід мотивує встановлювати фільтри і компенсатори. З іншого боку, у випадку недотримання рівнів напруги постачальником, споживач може вимагати компенсацію (що передбачено правилами енергопостачання в ряді країн).

Підсумовуючи аналітичний огляд, слід відзначити, що ефективне забезпечення якості електроенергії в сучасних умовах потребує комплексного підходу: постійного моніторингу PQ-показників, швидкої діагностики причин відхилень та застосування відповідних технічних засобів корекції на різних рівнях системи. Лише поєднання заходів на боці мережі (загальні компенсатори, стандартизація параметрів) і на боці споживача (фільтрація, захист обладнання) дозволяє досягти стабільного дотримання норм якості електроенергії в умовах росту навантажень і децентралізації генерації.

Висновки. Методи контролю і підвищення якості електроенергії інтенсивно розвиваються, пропонуючи як традиційні інженерні рішення, так і інноваційні підходи. До перевірених технічних засобів належать: конденсаторні батареї та реактори для підтримання рівня напруги; статичні вар-компенсатори (SVC) та статичні синхронні компенсатори (STATCOM) для динамічної компенсації реактивної потужності та флікеру; пасивні фільтри гармонік для найбільш проблемних частот; активні фільтри на силових інверторах, здатні в режимі реального часу очищувати мережу від широкого спектру гармонік; пристрої типу DVR та джерела безперебійного живлення для захисту відповідальних споживачів від провалів напруги та коротких перерв. Паралельно розробляються системи автоматичного керування цими засобами: зокрема, використання алгоритмів на основі штучного інтелекту дозволило покращити ефективність D-STATCOM при згладжуванні коливань напруги і компенсуванні несиметрії. В літературі останніх років також запропоновано концепції розподіленої компенсації, коли функції покращення PQ вбудовано у самі генератори і навантаження (наприклад, “розумні” мережеві інвертори з функцією фільтрації гармонік та регулювання напруги. Це особливо перспективно для мікромереж і активних розподільчих систем: проаналізовані дослідження підтверджують можливість

підвищення якості напруги в мікромережі за рахунок координації роботи розподілених джерел та накопичувачів. На стороні споживачів впроваджуються програми керування навантаженням, щоб знизити пікові кидки, а також встановлюються локальні засоби захисту (стабілізатори, фільтри) відповідно до вимог до якості живлення їхнього обладнання.

Комплексне забезпечення якості електроенергії потребує співпраці між усіма учасниками енергосистеми. Енергопостачальні підприємства повинні виконувати інвестування в модернізацію мереж (для зменшення внутрішнього опору, встановлення засобів компенсації і фільтрації на підстанціях), впроваджувати системи моніторингу PQ та швидкого реагування на відхилення (автоматичне перемикання мережевих конфігурацій, адаптивне керування збудженням генераторів тощо). Споживачі, особливо промислові, зі свого боку повинні дотримуватися норм емісії гармонік і реактивної потужності – для цього великі підприємства застосовують фільтрокомпенсуючі установки і пристрої плавного пуску. Виробники електротехніки продовжують вдосконалювати пристрої з точки зору електромагнітної сумісності (наприклад, майже всі сучасні LED-драйвери мають PFC-коректори, що дозволяє суттєво знизити коефіцієнт гармонік струму). Крім технічних, дієвими є економічні та нормативні механізми: диференціація тарифів та штрафні санкції за порушення показників якості. Наприклад, введення “контрактів якості” стимулює обленерго підтримувати напругу в заданих межах (інакше передбачена компенсація споживачам), а промислових споживачів – не перевищувати встановлені гармонічні струми (в іншому разі штраф або відключення). Такий підхід наразі застосовується у ряді країн і показує ефективність у зниженні кількості скарг на якість електропостачання.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. IEC 61000-4-30:2015. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*. 3rd edition. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2015.
2. EN 50160:2010. *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks*. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), Brussels, 2010.
3. IEEE Std 519-2014. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2014.
4. IEC 61000-4-15:2010. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications*. 2nd edition. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2010.
5. IEC 61000-4-7:2008. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation*. 2nd ed. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2008.

6. IEC 61000-4-5:2014. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test*. 3rd ed. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2014.
7. *Revised IEC and IEEE Standards for PQ Measurements for Users of PQ Monitoring Equipment*: Available at: <https://powerquality.blog/2021/07/30/revised-iec-and-ieee-standards-for-pq-measurements-for-users-of-pq-monitoring-equipment>
8. Lumbreras, D., Gálvez, E., Collado, A., & Zaragoza, J. (2020). *Trends in Power Quality, Harmonic Mitigation and Standards for Light and Heavy Industries: A Review*. *Energies*, 13(21), 5792. <https://doi.org/10.3390/en13215792>
9. Li J, Liu H, Wang D and Bi T (2021) *Classification of Power Quality Disturbance Based on S-Transform and Convolution Neural Network*. *Front. Energy Res.* 9:708131. doi: 10.3389/fenrg.2021.708131
10. *Detecting power quality issues*. Available at: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/power-quality/a-fresh-look-at-power-quality-basics?srsltid=AfmBOopXsnzVoXx0VPThYhgXsO2Y2RwdG9tgt3YTiu4IbBhhkLiKG>
11. *Power quality*. Available at: <https://new.abb.com/low-voltage/launches/power-quality>
12. Divya Soni, Upendra singh Tomar, Narottam Dutt Upadhyay *Grid Connected Wind Energy System Power Quality Improvement Using STATCOM*. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*. Volume 3, Issue 2, September 2023, pp. 335-337. DOI: 10.48175/IJARSCT-13050
13. V. Kuznetsov, M. Tryputen, Y. Kuznetsova, M. Babyak, V. Artemchuk and M. Kovzel, "Ways to Improve Power Quality under the Conditions of Industrial Enterprises," *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240801.
14. Lumbreras, D., Gálvez, E., Collado, A., & Zaragoza, J. (2020). *Trends in Power Quality, Harmonic Mitigation and Standards for Light and Heavy Industries: A Review*. *Energies*, 13(21), 5792. <https://doi.org/10.3390/en13215792>
15. Ali, Z.M.; Alenezi, F.Q.; Kandil, S.S.; Abdel Aleem, S.H. *Practical considerations for reactive power sharing approaches among multiple-arm passive filters in non-sinusoidal power systems*. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2018, 103, 660–675.
16. Augusto Matheus dos Santos Alonso, Danilo Iglesias Brandao, Tommaso Caldognetto, Fernando Pinhabel Marafão, Paolo Mattavelli, *A selective harmonic compensation and power control approach exploiting distributed electronic converters in microgrids*, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 115, 2020, 105452, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105452>.
17. M.E. Hamedani Golshan, Haidar Samet, *Updating stochastic model coefficients for prediction of arc furnace reactive power*, *Electric Power Systems Research*, Volume 79, Issue 7, 2009, Pages 1114-1120, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.eprs.2009.02.001>.
18. Haidar Samet, Aslan Mojallal, Teymoor Ghanbari, Mohammad Reza Farhadi *Enhancement of SVC performance in electric arc furnace for flicker suppression using a Gray-ANN based prediction method* *Int Trans Electr Energ Syst.* 2019; 29:e2811. pp.1-20. <https://doi.org/10.1002/etep.2811>

19. Chen, J.-H., Tan, K., & Lee, Y. (2022). *Intelligent controlled DSTATCOM for power quality enhancement*. *Energies*, 15(11), 4017. <https://doi.org/10.3390/en15114017>
20. Afonso, J. L., Tanta, M., Pinto, J. G. O., Monteiro, L. F. C., Machado, L., Sousa, T. J. C., & Monteiro, V. (2021). *A Review on Power Electronics Technologies for Power Quality Improvement*. *Energies*, 14(24), 8585. <https://doi.org/10.3390/en14248585>
21. Marini, A., Ghazizadeh, M. S., Mortazavi, S. S., & Piegari, L. (2019). *A harmonic power market framework for compensation management of DER based active power filters in microgrids*. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 113, 916–931. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.017>
22. Hafezi, H.; D'Antona, G.; Dedè, A.; Della Giustina, D.; Faranda, R.; Massa, G. *Power Quality Conditioning in LV Distribution Networks: Results by Field Demonstration*. *IEEE Trans. Smart Grid* 2017, 8, 418–427.

Received 26.03.2025.
Accepted 28.03.2025.

Monitoring and enhancement of power quality in industrial power networks

The aim of this research is a comprehensive analysis of power quality (PQ) issues in industrial power networks, as well as the development and systematization of methods for monitoring, diagnosing, and improving key PQ parameters, such as harmonic distortions, flicker, voltage sags, phase unbalance, and reactive power.

The methods. The study employs a combination of theoretical analysis, review of relevant standards (IEC 61000-4-30, EN 50160, IEEE 519), and practical experience in the implementation of modern digital PQ analyzers. The use of filters, compensators, and intelligent systems is analyzed, including DVR, STATCOM, hybrid active filters, and machine learning algorithms for classifying PQ events.

Findings. The research outlines the main PQ indicators and presents methods for their measurement, diagnosis, and compensation. Examples of implemented technical solutions for improving power quality are provided, including passive and active harmonic filters, SVC and STATCOM for flicker mitigation, methods for reducing phase unbalance, and protection against short-term voltage disturbances.

The originality. The study proposes a concept of distributed power quality compensation using smart inverters and charging stations. The application of neural networks and S-transforms for real-time identification of disturbance sources is discussed. The advantages of integrated approaches to both local and centralized PQ correction are substantiated.

Practical implementation. The results can be used by energy management engineers and enterprise personnel to build monitoring systems, protect critical equipment, and enhance energy efficiency. The proposed solutions reduce failure rates, energy losses, and maintenance costs, ensuring compliance with modern sustainable development standards.

Keywords: power quality, PQ standards, IEEE standards, EN 50160, harmonic distortion, flicker, distributed generation, microgrids, compensation, energy standards.

Стьопкін Василь Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії Українського державного університету науки і технологій, Дніпро, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-5727-8343>

Радченко Віталій Васильович – доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна.. <https://orcid.org/0000-0001-6473-2524>

Ровенський Олег Олександрович – студент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-0628-5188>

Єрофєєва Аліна Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-2981-4118>

Піліпенко В'ячеслав Олександрович – провідний фахівець RnD відділу Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна. <https://orcid.org/0009-0004-7301-2501>

Прихно Валерія Леонідівна – старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-7834-3618>

Stopkin Vasyl - Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine.

Radchenko Vitalij - Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Rovenskyi Oleh - Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Yerofieieva Alina - Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Pilipenko Viacheslav - Playtika Holding Corp, Dnipro, Ukraine.

Prykhno Valeriia - Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

ЗМІСТ

CONTENTS

Машталір С.В., Лендель Д.П. Обробка відео з дронів шляхом фрагментного аналізу	3	Mashtalir S.V., Lendel D.P. Drone video processing by fragment analysis	3
Зимогляд А.Ю., Гуда А.І., Ткаченко С.О. Вплив структури заповнення зразків при 3D друку на їх міцність	12	Zimoglyad A.Yu., Guda A.I., Tkachenko S.O. Influence of 3D printing samples filling structure on their strength	12
Єфіменко А.Ю., Койбічук В.В., Миненко С.В., Гриценко К.Г., Яценко В.В. Програмне забезпечення як катализатор розвитку кіберспортивної індустрії	23	Yefimenko A., Koibichuk V., Mynenko S., Hrytsenko K., Yatsenko V. Software as a catalyst for the esports industry development	23
Коваленко Є.О., Турчина В.А. Про покращення наближених розв'язків задачі паралельного упорядкування та аналіз моделі одного її узагальнення	35	Kovalenko Y.O., Turchyna V.A. On improving approximate solutions to parallel sequencing problem and one of its generalizations model analysis	35
Корнута В.А., Катамай Ю.В., Меренко Б.І., Дмитрів І.Я., Іванців Н.Т., Корнута О.В., Дячук А.В. Методи зменшення ризиків і помилки в роботі інтелектуальних автоматизованих систем нафтогазової галузі	48	Kornuta V.A., Katamay Y.V., Merenko B.I., Dmytriv I.Ya., Ivantsiv N.T., Kornuta O.V., Dyachuk A.V. Methods for reducing risks and errors in the operation of oil and gas industry intellectual automated systems	48
Ларіонов Г., Земляна Ю., Хворостян В., Булич Ю. Використання методу послідовної апроксимації до визначення повздожніх зусиль в металополімерному анкері під час проведення тестів на висмикування	59	Larionov Hr., Zemliana Yu., Khvorostian V., Bulych Yu. Method of sequential approximation using to determine the metal-resin anchor longitudinal forces distribution during its pullout testing	59

Малієнко О.О., Турчина В.А. Задача оптимального розподілу ресурсів для випадку обмежень на їх використання	75	Maliienko O.O., Turchyna V.A. Optimal resource allocation task under usage constraints	75
Мороз Б. І., Шишацький О.О. Методи, алгоритми та програми для виявлення помилок в геопросторовій базі даних на прикладі державного земельного кадастру	82	Moroz B., Shyshatsky O. Methods, algorithms, and programs for error detection in a geospatial database: a case study of the state land cadastre	82
Орлов С.К., Наконечна Т.В. Завдання забезпечення матеріалоподачі для інноваційного циліндричного принтера типу Fugo	93	Orlov S.K., Nakonechna T.V. The task of ensuring material feeding for an innovative cylindrical printer of the Fugo type	93
Руксов Є.В., Мороз Б.І. Аналіз методів підвищення рівня автоматизації робочого місця конструктора аеродинамічних виробів	102	Ruksov Y., Moroz B. Analysis of methods for increasing the level of automation in an aerodynamic product designer's workplace	102
Коломієць Л.В. Математична модель та алгоритм компенсації систематичних похибок координатно-вимірювальної машині	112	Kolomiets L.V. Mathematical model and algorithm for compensation of systematic errors of coordinate measuring machines	112
Козловський В.В., Шкварницька Т.Ю. Автоматизовані системи контролю геометричних параметрів деталей на базі координатно-вимірювальних технологій	120	Kozlovskiy V., Shkvarnytska T.Yu. Automated systems for controlling geometric parameters of parts based on coordinate measuring technologies	120
Безвесільна О.М., Ільченко В.М. Метод вимірювання прецезійних деталей на координатно- вимірювальній маши	128	Bezvesilnaya E., Ilchenko V. Method of measuring precession details on a coordinate measuring machine	128

Кімстач Т.В., Узлов К.І. Вплив хімічного складу на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn при її затвердінні в кокілі	135	Kimstach T.V., Uzlov K.I. Chemical composition influence on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronze during its solidification in die mold	135
Царик В.Ю., Гнатушенко Вікт. В., Селівьорова Т.В. Методи аналізу інтерфейсів веб-застосунків для підвищення інтерактивності	146	Tsaryk V., Hnatushenko Vikt., Selivorstova T. Methods for analyzing web application interfaces to increase interactivity	146
Кузнецов О. Алгоритми та методи в динамічних задачах оптимального розміщення доріжок у тривимірному друку	154	Kuzenkov O. Algorithms and methods in dynamic problems of optimal track placement in three-dimensional printing	154
Островська К.Ю., Порохнявий В.Г. Дослідження нейромережових моделей для відстеження погляду та фіксації об'єктів	170	Ostrovskaya K., Porokhnyavyy V. Research on neural network models for eye tracking and object fixation	170
Стрельбіцький В.В. Використання 3D типових тіл-примітивів САПР AutoCad до розв'язку позиційних задач нарисної геометрії	178	Strelbitskiy V.V. Use of typical 3D primitive bodies in AutoCad program for solving positional problems of descriptive geometry	178
Клименко А.М., Карпенко Н.В., Герасимов В.В. Шифрування та розшифрування даних у datastore для безпечного локального зберігання	187	Klymenko A., Karpenko N., Gerasimov V. Encryption and decryption of data in datastore for secure local storage	187
Стьопкін В., Радченко В., Ровенський О., Єрофеєва А., Піліпенко В., Прихно В. Контроль та покращення якості електроенергії в мережах промислових підприємств	197	Stopkin V., Radchenko V., Rovenskiy O., Yerofieieva A., Pilipenko V., Prykhno V. Monitoring and enhancement of power quality in industrial power networks	197

РЕФЕРАТИ

УДК 004.8

Машталір С.В., Лендъел Д.П. **Обробка відео з дронів шляхом фрагментного аналізу** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.3 – 11.

В цьому дослідженні ми зосерешилися на аналізі відео з дронів для вирішення задачі обробки фрагментів відео, знятих рухомою камерою. Кожен кадр розділений на менші фрагменти за допомогою методу сегментації на основі сітки, що дає змогу локалізувати та детально аналізувати рух. Сингулярне розкладання (SVD) застосовується для обчислення норми Кі Фан для кожного фрагменту, що дозволяє виявити динамічні зміни між послідовними кадрами.

Бібл. 28.

УДК 539.4, 539.5

Зимогляд А.Ю., Гуда А.І., Ткаченко С.О. **Вплив структури заповнення зразків при 3D друку на їх міцність** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.12 – 22.

У статті описано дослідження впливу структури заповнення 3D деталі на механічну міцність. Параметр заповнення (Infill) впливає на міцність та механічні властивості отриманого тривимірного об'єкта більше за інші. Тому саме цей параметр було досліджено в цій статті, її вплив на міцність надрукованої деталі.

Бібл. 3.

УДК 004.05

Єфіменко А.Ю., Койбічук В.В., Миненко С.В., Гриценко К.Г., Яценко В.В. **Програмне забезпечення як каталізатор розвитку кіберспортивної індустрії** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.23 – 34.

Метою роботи є визначення ролі програмного забезпечення як каталізатору розвитку кіберспортивної індустрії. У статті виокремлено технологічні особливості сучасних графічних процесорів (GPU), що використовуються у кіберспортивній індустрії, а саме: кількість CUDA/Shader-ядер, типи інструкцій, підтримку нових технологій, пропускну здатність пам'яті та технології трасування променів, що у комплексі гарантує обробку та виведення високоякісної графіки. Запропоновано класифікацію функціональних видів програмного забезпечення, що становлять єдину систему взаємозв'язків.

Бібл. 16.

УДК 519.854.2

Коваленко Є.О., Турчина В.А. **Про покращення наближених розв'язків задачі паралельного упорядкування та аналіз моделі одного її узагальнення** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.35 – 47.

Розглядається можливість покращення наближених розв'язків в задачах паралельного упорядкування, отриманих за відомими алгоритмами, за рахунок дозволу переривання робіт. Проаналізовано вплив дозволу переривань на оптимальність розв'язку.

Для розв'язання узагальненої задачі упорядкування у випадках, коли відповідний граф є регулярним і відноситься до підкласу повних дводольних розроблено модифікований алгоритм, що враховує допустимість переривань при виконанні відповідних робіт.

Бібл. 8, іл. 3, табл. 0.

УДК 629.735

Корнута В.А., Катамай Ю.В., Меренко Б.І., Дмитрів І.Я., Іванців Н.Т., Корнута О.В., Дячук А.В. **Методи зменшення ризиків і помилок в роботі інтелектуальних автоматизованих систем нафтогазової галузі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.48 – 58.

У статті розглянуто основні методи зменшення ризиків та помилок у роботі інтелектуальних автоматизованих систем нафтогазової галузі, зокрема, вдосконалені підходи до верифікації та тестування. Досліджено застосування формальних та неформальних методів верифікації, а також модульного, інтеграційного та тестування на основі властивостей у специфічних системах ІАС. Визначено підходи для вимірювання структурного покриття та оптимізації процесу тестування.

Бібл. 18, іл. 1.

УДК 622.8.1/.8:519.65:539.3

Ларіонов Г., Земляна Ю., Хворостян В., Буліч Ю. **Використання методу послідовної апроксимації до визначення повздовжніх зусиль в металополімерному анкері під час проведення тестів на висмикування** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.59 – 74.

Стаття присвячена порівнянню результатів досліджень на висмикування металополімерних анкерів з врахуванням особливостей в системах анкерна штанга-фіксуєча суміш-гірська порода з параметрами отриманими з використанням методу скінчених елементів. Отримані результати демонструють відповідність механізму навантаження металополімерних анкерів. Отримані спрощені формули для визначення залежностей у оболонці фіксуєчої суміші від конструктивних параметрів системи. Виконано порівняння отриманих результатів з параметрами отриманими методом скінчених елементів. Представлено графічні залежності. Зроблено висновки про розподіл основних зусиль вздовж металополімерного анкера. Зроблено висновок про ефективність застосування запропонованого методу до аналізу результатів SEPT тестування.

Бібл. 26, іл. 5.

УДК 519.8:519.178

Малієнко О.О., Турчина В.А. **Задача оптимального розподілу ресурсів для випадку обмежень на їх використання** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.75 – 81.

Розглядається узагальнення однієї із задач дискретної оптимізації, що пов'язана з оптимальною організацією виробничого процесу. Це узагальнення стосується розподілу ресурсів для виконання фіксованої множини завдань за наявності спеціальних умов їх використання. Введено поняття множини фіксованих робіт, визначено умови їх узгодженості, розв'язності та балансу завантаження. Досліджено вплив таких об-

межень на довжину оптимального упорядкування. Проведено аналіз аномальних випадків, коли зменшення часу виконання завдань, збільшення кількості виконавців або послаблення технологічних обмежень призводить до погіршення розв'язку.

Бібл. 7, іл. 1, табл. 4.

УДК 004:02

Мороз Б. І., Шишацький О.О. **Методи, алгоритми та програми для виявлення помилок в геопросторовій базі даних на прикладі державного земельного кадастру** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.82 – 92.

Великі геопросторові бази даних містять великі обсяги інформації, котрі можуть містити помилки, спричинені людським фактором, технічними неточностями або розбіжностями у проєкціях. Ці помилки негативно впливають на точність даних і ефективність їх використання, що важливо для кадастрових систем. У статті розглянуто методи автоматизованого пошуку помилок у базі земельних ділянок Державного земельного кадастру України. Дослідження зосереджене на використанні просторових запитів, зокрема point-in-polygon та polygon-in-polygon, для пошуку помилкових об'єктів. Результати показують, що запропоновані алгоритми підвищують якість даних завдяки автоматизованому контролю правильності їх внесення. Впровадження таких методів сприяє надійності кадастрової інформації та її застосування у сфері містобудування і земельного управління.

Бібл. 7, іл. 13.

УДК 519.688

Орлов С.К., Наконечна Т.В. **Завдання забезпечення матеріалоподачі для інноваційного циліндричного принтера типу Fugo** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.93 – 101.

У статті розглянуто задачу подачі матеріалу для циліндричного 3D принтера Fugo, що є ключовим для забезпечення точності друку. Запропоновано алгоритм розрахунку об'єму матеріалу, який базується на формулах об'ємів тіл обертання для кусково-неперервної функції, що описують форму драма. Використано метод трапецій для чисельного інтегрування, що забезпечує точність, відповідну технічним вимогам насоса. Результати підтверджують ефективність алгоритму, що дозволяє точно контролювати подачу матеріалу та забезпечує високу якість друку.

Бібл. 5, іл. 6, табл. 1.

УДК 004.94

Руксов Є.В., Мороз Б.І. **Аналіз методів підвищення рівня автоматизації робочого місця конструктора аеродинамічних виробів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.102 – 111.

Проведено порівняльний аналіз існуючих напрацювань в сфері автоматизації конструювання аеродинамічних виробів. Визначені перспективні напрямки досліджень, які мають потенціал підвищення ефективності 3D-моделювання аеродинамічних виробів. Запропонована концептуальна схема архітектури вдосконаленого автоматизованого робочого місця конструктора аеродинамічних виробів.

Бібл. 12, іл. 2.

УДК 531.7

Коломієць Л.В. **Математична модель та алгоритм компенсації систематичних похибок координатно-вимірювальної машині** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.112 – 119.

Стаття присвячена розробці математичної моделі та алгоритму компенсації систематичних похибок координатно-вимірювальних машин (КВМ). Запропонована модель враховує геометричні, температурні, кінематичні похибки та міжосьові взаємодії. Описано методику побудови просторової сітки похибок, що дозволяє виконувати оперативну корекцію координат у режимі реального часу. Розроблено алгоритм компенсації, який включає етапи калібрування, обчислення поправок та адаптивного уточнення моделі за результатами вимірювань. Реалізація запропонованого підходу підвищує точність вимірювань та забезпечує надійний контроль геометричних параметрів деталей.

Бібл. 8, іл. 1.

УДК 531.7

Козловський В.В., Шкварницька Т.Ю. **Автоматизовані системи контролю геометричних параметрів деталей на базі координатно-вимірювальних технологій** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.120 – 127.

У статті розглянуто автоматизовані системи контролю геометричних параметрів деталей на базі координатно-вимірювальних технологій. Проаналізовано сучасні підходи до забезпечення високої точності вимірювань у промислових умовах. Особливу увагу приділено питанням метрологічного забезпечення, обробки вимірювальних даних та інтеграції з цифровими системами проектування та виробництва. Наведено приклади застосування координатно-вимірювальних машин для контролю деталей складної форми. Запропоновано перспективні напрямки розвитку таких систем з урахуванням вимог Індустрії 4.0, включаючи підвищення рівня автоматизації та інтеграцію з іншими методами неруйнівного контролю.

Бібл. 9, іл. 1.

УДК 531.7

Безвесільна О.М., Ільченко В.М. **Метод вимірювання прецезійних деталей на координатно-вимірювальній машині** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.128 – 134.

У статті представлено методику вимірювання прецезійних деталей на координатно-вимірювальній машині. Запропоновано комплексний підхід, що включає математичне моделювання систематичних та випадкових похибок, адаптивну корекцію на основі стохастичних диференціальних рівнянь та оптимізацію траєкторій вимірювання. Особливу увагу приділено температурним деформаціям та динамічним похибкам. Проведена експериментальна перевірка підтвердила підвищення точності вимірювань на 15-20% та зменшення випадкових складових на 10-15%. Розроблена методика може бути

використана для вдосконалення метрологічного забезпечення у високоточному виробництві.

Бібл. 10, іл. 1

УДК 691.73:669.35:621.74.043:620.17

Кімстач Т.В., Узлов К.І. **Вплив хімічного складу на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn при її затвердінні в кокілі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.135 – 145.

Приведено результати експериментальних досліджень щодо впливу хімічного складу на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn при її затвердінні в кокілі. Співвідношення компонентів визначали безрозмірним критерієм K_R , що обчислюють за формулою: $K_R = (1 - 0,01 \cdot nn) \cdot (Al-Si-Mn) / (1 + Sn)^2$ і який дорівнює 0,32...0,85. Використання результатів роботи дозволить прогнозувати рівень механічних властивостей ливарної алюмінієвої бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn з $K_R = 0,32...0,56$ та адаптувати рівні її властивостей за рахунок відповідної корекції хімічного складу для виготовлення литих деталей з урахуванням особливостей та умов їх роботи в верстатно-, приладо-, машино-, суднобудуванні та інших галузях промисловості.

Бібл. 15, іл. 4, табл. 2.

УДК 004.054

Царик В.Ю., Гнатушенко Вікт. В., Селівьорстова Т.В. **Методи аналізу інтерфейсів веб-застосунків для підвищення інтерактивності** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.146 – 153.

У статті розглядаються сучасні методи аналізу інтерфейсів веб-застосунків, спрямовані на підвищення їхньої інтерактивності. Автори вивчають основні аспекти проектування користувацьких інтерфейсів, що забезпечують зручність та ефективність взаємодії користувачів із веб-сайтами. Окрема увага приділяється аналізу інтерфейсів з точки зору їхньої адаптивності до різних пристроїв, а також інтеграції новітніх технологій для покращення користувацького досвіду. Дослідження виявило, що правильний підхід до проектування інтерфейсів значно підвищує рівень інтерактивності та задоволеність користувачів.

Бібл. 4.

УДК 519.8

Кузнецов О. **Алгоритми та методи в динамічних задачах оптимального розміщення доріжок у тривимірному друку** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.154– 169.

Робота присвячена вивченню алгоритмів і методів розрахунку оптимальних траєкторій при 3-D друці в динамічній постановці задачі теорії оптимального розбиття множин. Актуальність цього завдання полягає в значній актуалізації 3-D друку, як при виготовленні медичної, військової, так і виробів подвійного призначення.

Бібл. 8.

УДК 004.4:681.518

Островська К.Ю., Порохнявий В.Г. **Дослідження нейромережевих моделей для відстеження погляду та фіксації об'єктів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.170– 177.

В роботі представлено порівняння нейромережевих моделей для відстеження погляду та фіксації об'єктів. У роботі були вивчені алгоритми виявлення подій з різних областей: I-VT і I-DT, засновані на порогових значеннях, модель випадкового лісу в галузі машинного навчання і модель CNN в галузі глибокого навчання.

Бібл. 8.

УДК 004.94:744

Стрельбіцький В.В. **Використання 3D типових тіл-примітивів САПР AutoCad до розв'язку позиційних задач нарисної геометрії** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.178– 186.

Графічна підготовка студентів технічних спеціальностей є основою інженерної освіти. Аналіз успішності з дисциплін «Нарисна геометрія» та «Інженерна графіка» виявив основну причину зниження результатів за останні роки - недостатність базових знань, набутих у школі. Для покращення засвоєння матеріалу та оптимізації навчального процесу необхідно впроваджувати інноваційні методи, які розвивають просторову уяву та професійні навички. У даній роботі продемонстровано використання комп'ютерної візуалізації для вивчення перерізів тривимірних тіл (конуса, сфери, циліндра) площиною в програмі AutoCAD. Такий підхід дозволяє краще підготувати майбутніх інженерів до розв'язування реальних задач. Простота побудови комп'ютерної моделі дозволяє студентам візуалізувати отримані об'єкти на січній площині, а також їх прямокутні проекції на основні площини.

Бібл. 9. Іл. 8. Табл.

УДК 004.056.53

Клименко А.М., Карпенко Н.В., Герасимов В.В. **Шифрування та розшифрування даних у datastore для безпечного локального зберігання** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.187– 196.

Актуальність дослідження зумовлена ризиками витоку конфіденційних даних у мобільних додатках. Розглянуто проблему відкритого зберігання даних у DataStore Android. Мета – забезпечити безпечне локальне збереження токенів через AES-шифрування (CBC, PKCS7). Підхід, запропонований у статті, запобігає несанкціонованому доступу, що підвищує безпеку чутливої інформації

Бібл. 9.

УДК 621.316.925

Стьопкін В., Радченко В., Ровенський О., Єрофєєва А., Піліпенко В., Прихно В. **Контроль та покращення якості електроенергії в мережах промислових підпри-**

ємств // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(157). – Дніпро, 2025. – С.197–209.

Метою дослідження є комплексний аналіз проблем якості електроенергії (PQ) в мережах промислових підприємств, а також розробка та систематизація методів контролю, діагностики і покращення основних PQ-параметрів, таких як гармонічні спотворення, флікери, провали напруги, несиметрія фаз і реактивна потужність.

У роботі використано поєднання теоретичного аналізу, огляду стандартів (ІЕС 61000-4-30, EN 50160, IEEE 519) та практичного досвіду впровадження сучасних цифрових аналізаторів PQ. Проаналізовано застосування фільтрів, компенсаторів та інтелектуальних систем, зокрема DVR, STATCOM, гібридних активних фільтрів, а також машинного навчання для класифікації PQ-подій.

Бібл. 22.

UDC 004.8

Mashtalir S.V., Lendel D.P. **Drone video processing by fragment analysis** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.3 – 11.

This study focused on analyzing drone video to address the inherent complexity of processing videos captured with a moving camera. Each frame is divided into smaller fragments through a grid-based segmentation technique, enabling a localized and detailed motion analysis. Singular Value Decomposition (SVD) is applied to compute the Ki Fan norm for each fragment, enabling the detection of dynamic changes between consecutive frames.

Bible 28.

UDC 539.4, 539.5

Zimoglyad A.Yu., Guda A.I., Tkachenko S.O. **Influence of 3D printing samples filling structure on their strength** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.12 – 22.

The article describes the study of the influence of the filling structure of a 3D part on the mechanical strength. The filling parameter (Infill) affects the strength and mechanical properties of the resulting three-dimensional object more than others. Therefore, this parameter was studied in this article, its influence on the strength of the printed part.

Bibl. 3.

UDC 004.05

Yefimenko A., Koibichuk V., Mynenko S., Hrytsenko K., Yatsenko V. **Software as a catalyst for the esports industry development** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.23 – 34.

The purpose of the work is to determine the role of software as a catalyst for the development of the e-sports industry. The article highlights the technological features of modern graphics processors (GPU) used in the e-sports industry, namely: the number of CUDA/Shader cores, types of instructions, support for new technologies, memory bandwidth and ray tracing technology, which in the complex guarantees the processing and output of high-quality graphics. A classification of functional types of software that constitute a single system of relationships is proposed.

Bibl. 16.

UDC 519.854.2

Kovalenko Y.O., Turchyna V.A. **On improving approximate solutions to parallel sequencing problem and one of its generalizations model analysis** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.35 – 47.

The possibility of improving approximate solutions in parallel sequencing problems obtained via known algorithms by allowing job interruptions is considered. The influence of allowing interruptions on the solution optimality is analyzed. To solve the generalized sequencing problem in cases where the corresponding graph is regular and belongs to the subclass of complete bipartite graphs, a modified algorithm has been developed that takes into account the admissibility of interruptions during the corresponding jobs' execution.

Bible 8, fig. 3, tab. 0.

UDC 629.735

Kornuta V.A., Katamay Y.V., Merenko B.I., Dmytriv I.Ya., Ivantsiv N.T., Kornuta O.V., Dyachuk A.V. **Methods for reducing risks and errors in the operation of oil and gas industry intellectual automated systems** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.48 – 58.

The article considers the main methods of reducing risks and errors in the operation of intelligent automated systems in the oil and gas industry, in particular, improved approaches to verification and testing. The application of formal and informal verification methods, as well as modular, integration and property-based testing in specific IAS systems is investigated. Approaches for measuring structural coverage and optimizing the testing process are determined.

Bibl.18, ill. 1.

УДК 622.8.1/.8:519.65:539.3

Larionov Hr., Zemliana Yu., Khvorostian V., Bulych Yu. **Method of sequential approximation using to determine the metal-resin anchor longitudinal forces distribution during its pullout testing** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.59 – 74.

Present paper devoted to the results of SEPT investigating with taking into account the specialty of anchor at rebar- fixing compound-rock system with the parameters obtained with finite element method (FEM). Obtained results demonstrate correspondence to viewpoints of metal resin anchor loading mechanism. Simplified formulas of efforts dependences in fixing compound shell vs construction system parameters were obtained. Do results comparison with ones, what obtained with FEM method. Graphic dependencies are presented. Conclusions about main parameters of efforts along resin anchor components distributions done. Conclusions on using effectiveness of proposed method for analysing SEPT testing parameters obtaining made.

Bibl.26, ill. 5.

UDC 519.8:519.178

Maliienko O.O., Turchyna V.A. **Optimal resource allocation task under usage constraints** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.75 – 81.

This paper presents a generalization of a discrete optimization problem related to the optimal organization of a production process. The generalization concerns the allocation of resources for executing a fixed set of tasks under specific usage constraints. The concept of a fixed-task set is introduced, along with the conditions for its consistency, solvability, and workload balance. The impact of these constraints on the length of the optimal sequencing is analyzed. Anomalous cases are examined, where reducing task execution time, increasing the number of executors, or relaxing technological constraints lead to a deterioration of the solution.

Ref. 7, fig. 1, tabl.4.

UDC 004:02

Moroz B., Shyshatsky O. **Methods, algorithms, and programs for error detection in a geospatial database: a case study of the state land cadastre** // System technologies.

N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.82 – 92.

Large geospatial databases contain large amounts of information that may be subject to human errors, technical inaccuracies, or projection differences. These amendments have a negative impact on the accuracy of data and the efficiency of their recording, which is important for cadastral systems. The article examines the methods of automated search for clearances in the database of land plots of the State Land Cadastre of Ukraine. The research is focused on a wide variety of spatial queries, point-in-polygon and polygon-in-polygon, to search for soft objects. The results show that the proposed algorithms promote the accuracy of data and therefore automated control of the correctness of their entry. The promotion of such methods is consistent with the reliability of cadastral information and its importance in the field of local development and land management.

Ref. 7, Fig. 13.

UDC 519.688

Orlov S.K., Nakonechna T.V. **The task of ensuring material feeding for an innovative cylindrical printer of the Fugo type** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.93 – 101.

The article considers the task of material feeding for the cylindrical 3D printer Fugo, which is crucial for ensuring print accuracy. An algorithm for calculating the material volume based on the formulas for the volumes of solids of revolution for a piecewise continuous function describing the drum's shape is proposed. The trapezoidal method was used for numerical integration, ensuring accuracy corresponding to the pump's technical requirements. The results confirm the algorithm's effectiveness, allowing precise control of material feeding and ensuring high print quality.

Ref. 5, fig. 6, tables 1.

UDC 004.94

Ruksov Y., Moroz B. **Analysis of methods for increasing the level of automation in an aerodynamic product designer's workplace** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.102 – 111.

A comparative analysis of existing developments in the field of automation of aerodynamic product design has been conducted. Promising research directions have been identified that have the potential to increase the efficiency of 3D modeling of aerodynamic products. A conceptual scheme of the architecture of an improved automated workplace of an aerodynamic product designer has been proposed.

Ref. 12, fig. 2.

UDC 531.7

Kolomiets L.V. **Mathematical model and algorithm for compensation of systematic errors of coordinate measuring machines** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.112 – 119.

The article is devoted to the development of a mathematical model and an algorithm for compensating systematic errors of coordinate measuring machines (CMMs). The proposed model takes into account geometric, thermal, kinematic errors, and inter-axis interactions. A

method for constructing a spatial error grid is described, allowing real-time correction of measured coordinates. An error compensation algorithm is developed, including calibration, correction calculation, and adaptive model refinement based on measurement results. Implementation of the proposed approach improves measurement accuracy and ensures reliable control of the geometric parameters of parts.

Bibl.8, ill. 1.

UDC 531.7

Kozlovskiy V., Shkvarnytska T.Yu. **Automated systems for controlling geometric parameters of parts based on coordinate measuring technologies** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.120 – 127.

The article considers automated systems for geometric parameter control of parts based on coordinate measuring technologies. Modern approaches to ensuring high measurement accuracy in industrial environments are analyzed. Special attention is paid to metrological support, measurement data processing, and integration with digital design and manufacturing systems. Examples of using coordinate measuring machines for controlling complex-shaped parts are provided. Promising directions for the development of such systems are proposed, considering Industry 4.0 requirements, including increasing the level of automation and integration with other non-destructive testing methods.

Bibl.9, ill. 1.

UDC 531.7

Bezvesilnaya E., Ilchenko V. **Method of measuring precession details on a coordinate measuring machine** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.128 – 134.

The article presents a methodology for measuring precision parts on a coordinate measuring machine. A comprehensive approach is proposed, combining mathematical modeling of systematic and random errors, adaptive correction based on stochastic differential equations, and measurement trajectory optimization. Special attention is paid to thermal deformations and dynamic errors. Experimental verification demonstrated a 15-20% improvement in measurement accuracy and a 10-15% reduction in random errors. The developed methodology can enhance metrological support in high-precision manufacturing.

Bibl.10, ill. 1.

UDC 691.73:669.35:621.74.043:620.17

Kimstach T.V., Uzlov K.I. **Chemical composition influence on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronze during its solidification in die mold** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.135 – 145.

Chemical composition influence on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronze during its solidification in die experimental studies results are presented. The ratio of components was determined by the dimensionless criterion K_R , calculated by formula: $K_R = (1 - 0,01 \cdot nn) \cdot (Al-Si-Mn) / (1 + Sn)^2$ and which is equal 0.32...0.85. This work results using will allow predicting the mechanical properties level of Cu-Al-Si-Sn-Mn system cast aluminum bronze with $K_R = 0.32...0.56$ and adapting its properties levels by chemical composition appropriate correction for cast parts manufacturing, taking into account characteristics and their

operation conditions in machine tool, instrument, mechanical, shipbuilding and other industries.

Ref.15, fig. 4, table 2.

UDC 004.054

Tsaryk V., Hnatushenko Vikt., Selivorstova T. **Methods for analyzing web application interfaces to increase interactivity** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.146 – 153.

The article examines modern methods of analyzing web application interfaces aimed at enhancing their interactivity. The authors explore key aspects of user interface design that ensure the convenience and effectiveness of user interaction with websites. Special attention is given to the analysis of interfaces in terms of their adaptability to different devices and the integration of new technologies to improve the user experience. The research reveals that a proper approach to interface design significantly increases interactivity and user satisfaction.

Bibl. 4.

UDC 519.8

Kuzenkov O. **Algorithms and methods in dynamic problems of optimal track placement in three-dimensional printing** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.154 – 169.

The work is devoted to the study of algorithms and methods for calculating optimal trajectories in 3-D printing in the formulation of a dynamic problem of the theory of optimal set partitioning. The relevance of this task lies in the significant actualization of 3-D printing, both in the manufacture of medical, military and dual-use products.

Bibl. 8.

UDC 004.4:681.518

Ostrovska K., Porokhnyavyi V. **Research on neural network models for eye tracking and object fixation** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.170 – 177.

The paper presents a comparison of neural network models for eye tracking and object fixation. In this paper, event detection algorithms from different domains were studied: I-VT and I-DT, based on threshold values, a random forest model in the field of machine learning, and a CNN model in the field of deep learning.

Bibl. 9.

UDC 004.94:744

Strelbitskyi V.V. **Use of typical 3D primitive bodies in AutoCad program for solving positional problems of descriptive geometry** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.178 – 186.

Graphical training of technical students is the basis of engineering education. The analysis of academic performance in “Descriptive Geometry” and “Engineering Graphics” has revealed the main reason for the decline in results in recent years - lack of basic knowledge acquired at school. To improve learning and optimize the learning process, it is necessary to introduce innovative methods that develop spatial imagination and professional skills. This paper demonstrates the use of computer visualization for studying sections of three-

dimensional bodies (cone, sphere, cylinder) by plane in AutoCAD program. This approach allows to better prepare future engineers for solving actual problems. The simplicity of building a computer model allows students to visualize the resulting objects in the secant plane, as well as their rectangular projections on the principal planes.

Ref.9., Fig.8.

UDC 004.056.53

Klymenko A., Karpenko N., Gerasimov V. **Encryption and decryption of data in datastore for secure local storage** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.187 – 196.

The relevance of this study is determined by the growing threats of data leakage in mobile applications, where sensitive user information such as tokens, passwords, and API keys are often stored insecurely. Local storage on Android devices remains a critical aspect of application security, as improper handling of sensitive data can lead to unauthorized access, data breaches, and financial or reputational damage. This research focuses on addressing the problem of insecure storage within Android's DataStore and proposes a secure encryption-based approach to mitigate risks.

Bibl. 9.

UDC 621.316.925

Stopkin V., Radchenko V., Rovenskyi O., Yerofieieva A., Pilipenko V., Prykhno V. **Monitoring and enhancement of power quality in industrial power networks** // System technologies. N 2(157) - Dnipro, 2025.- P.197 – 209.

The aim of this research is a comprehensive analysis of power quality (PQ) issues in industrial power networks, as well as the development and systematization of methods for monitoring, diagnosing, and improving key PQ parameters, such as harmonic distortions, flicker, voltage sags, phase unbalance, and reactive power.

The study employs a combination of theoretical analysis, review of relevant standards (IEC 61000-4-30, EN 50160, IEEE 519), and practical experience in the implementation of modern digital PQ analyzers. The use of filters, compensators, and intelligent systems is analyzed, including DVR, STATCOM, hybrid active filters, and machine learning algorithms for classifying PQ events.

Bibl. 22.

Системні технології
ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
Випуск 2 (157)

Головний редактор: к.т.н., доц. Т.В. Селівьорстова

Технічний редактор та секретар збірки: к.т.н., доц. К.Ю. Островська

Здано до набору 28.03.2025. Підписано до друку 31.03.2025.

Формат 60x84 1/16. Друк - різнограф. Папір типограф.

Умов. друк арк. – 16,07. Обл.–видавн. арк. – 14,06.

Тираж 300 прим. Замовл. – 02/25

Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,
кафедра Інформаційних технологій та систем: ІВК «Системні технології»
49600, Дніпро, а/с 493

<http://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:

Серія КВ № 8684 від 23 квітня 2004 рік

Редакційна колегія

Селівьорстова Тетяна Віталіївна
(*головний редактор*)

доцент, кандидат технічних наук

Алпатов Анатолій Петрович

Член-кореспондент НАН України,
професор, доктор технічних наук

Архипов Олександр Євгенійович

професор, доктор технічних наук

Бабічев Сергій Анатолійович

доцент, доктор технічних наук

Білозьоров Василь Євгенович

професор,

доктор фізико-математичних наук

Гече Федір Елемирович

професор, доктор технічних наук

Гуда Антон Ігорович

(*заст. головного редактора*)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Вікторія Володимирівна

(*вчений секретар*)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Володимир Володимирович

професор, доктор технічних наук

Гожий Олександр Петрович

професор, доктор технічних наук

Єрьомін Олександр Олегович

професор, доктор технічних наук

Кіріченко Людмила Олегівна

професор, доктор технічних наук

Світличний Дмитро Святозарович

професор, доктор технічних наук

Скалозуб Владислав Васильович

професор, доктор технічних наук

Хандецький Володимир Сергійович

професор, доктор технічних наук

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Інститут технічної механіки

НАНУ і ДКАУ, Україна

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського", Україна

Jan Evangelista Purkyně University

in Ústí nad Labem

Університет імені Яна Євангеліста Пуркіне, Усті над Лабем, Чеська Республіка

Дніпровський національний університет імені

Олеся Гончара, Україна

Ужгородський національний університет, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Національний технічний університет

«Дніпровська політехніка», Україна

Чорноморський національний університет імені

П.Могилы, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Харківський національний університет

радіоелектроніки, Україна

Akademia Górniczo-Hutnicza

Краківська гірничо-металургійна академія ім. С.

Сташіца, Польща

Український державний університет науки і

технологій, ННІ «Дніпровський інститут

інфраструктури і транспорту»Україна

Дніпровський національний університет імені

Олеся Гончара, Україна