

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Луцький національний технічний університет

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

DOI 10.36910/6775-2313-5352-2026-28

Збірник наукових праць

Випуск 28
(травень, 2026)

Луцьк 2026

УДК 004, 519, 531, 620, 621, 623, 681

Рекомендовано до друку науково-технічною радою Луцького національного технічного університету, протокол №10 від 27 травня 2026 р.

Зареєстрований Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення як суб'єкт у сфері друкованих медіа (рішення №40 від 11.01.2024 р.). Ідентифікатор R30-02458. ISSN: 2313-5352

Засновник Луцький національний технічний університет

Друкується в авторській редакції

«Перспективні технології та прилади» м. Луцьк, травень 2026 р. Луцьк : ЛНТУ, 2026. 98 с.

В збірник включені статті, що відображають наукові та практичні результати сучасних розробок технології інформаційно-вимірювальних технологій та телекомунікацій, електроніки; вимірювальної та радіотехніки, автоматизованих технологічних комплексів, особливості експлуатації та перевірки засобів вимірювань, медичних приладів і систем. Представленні сучасні досягнення та перспективні напрямки розвитку технології виготовлення та складання машин і приладів в різних галузях народного господарства.

Контактна інформація:

Україна, 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, Луцький національний технічний університет, факультет робототехніки та штучного інтелекту, кафедра автоматизації та безпілотних систем.

Телефон: (050) 665-74-01

e-mail: y.lapchenko@lntu.edu.ua.

| | |
|--|--|
| ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ВИДАННЯ | |
| Повстяной Олександр Юрійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна. h-індекс:8, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1416-225X | |
| ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА | |
| Четвержук Тарас Іванович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна. h-індекс:4, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4445-4632 | |
| ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР: | |
| Лапченко Юрій Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна. h-індекс:1, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7374-4770 | |
| РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ | |
| 1 | Денисюк Віктор Юрійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна. h-індекс:1, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9268-5489 . |
| 2 | Заблоцький Валентин Юрійович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна. h-індекс:5, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2921-0031 |
| 3 | Придальний Борис Іванович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна. h-індекс:3, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8565-5986 |
| 4 | Пристапа Станіслав Олексійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна. h-індекс:4, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3705-1541 |
| 5 | Ткачук Анатолій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна. h-індекс:6, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9085-7777 |
| 6 | Антонюк Віктор Степанович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна. h-індекс:7, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0690-2411 |
| 7 | Кузь Микола Васильович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна. h-індекс:3, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9875-1579 |
| 8 | Мацуй Анатолій Миколайович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна. h-індекс:4, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5544-0175 |
| 9 | Паламар Михайло Іванович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою приладів і контрольно-вимірювальних систем, ТНТУ ім. І. Пулюя, Україна. h-індекс:5, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8255-8491 |
| 10 | Пристапа Анатолій Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, Проректор з наукової роботи Національний університет «Чернігівська політехніка», Україна. h-індекс:4, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9412-2698 |
| 11 | Ткачук Андрій Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки, державний університет «Житомирська політехніка», Україна. h-індекс:7, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-2466-6299 |
| 12 | Свіць Антоній, доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютеризації та роботизації виробництва, факультет машинобудування, Люблінська політехніка, Польща. h-індекс:17, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0405-4009 |
| 13 | Рібейро Луїс, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри механічних технологій, Політехнічний інститут Браганси, Португалія. h-індекс:5, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4336-6216 . |
| 14 | Павлушевич Єва, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації промислових процесів, факультет машинобудування, Білостоцький технічний університет, Польща. h-індекс:16, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-3297-7970 |
| 15 | Менга Нікола, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки, Політехнічний університет Барі, Італія. h-індекс:22, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4728-1773 |

| ЗМІСТ | |
|--|-----------|
| Diduk V., Kisil T., Kompaniets M. DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF AN OPTOELECTRONIC SYSTEM FOR AUTOMATED INSPECTION OF MICRODEFECTS IN LAYERS OF ADDITIVELY MANUFACTURED PARTS..... | 5 |
| Malovychko H., Machulianskyi O. OPTICALLY SELECTIVE STRUCTURES BASED ON NANOSCALE CHROMIUM CONDENSATES FOR PHOTOTHERMAL ENERGY CONVERTERS..... | 13 |
| Бартков М. С. РОЗРОБКА ТА КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО СТЕНДА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВАКУУМНИХ ЗАХОПЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ..... | 19 |
| Денисюк В. Ю. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ КЛІМАТИЧНИМИ ВИПРОБУВАННЯМИ ГУМОТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО ЗОРУ | 24 |
| Защепкіна Н. М., Тимчик Р. Г. НАЛАШТУВАННЯ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТА НА ВЕРСТАТІ З ЧПК..... | 32 |
| Литвинов О. О. ОБРОБКА ТА АНАЛІЗ ВІБРОСИГНАЛІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ШАРОВИХ ОПОР АВТОМОБІЛЯ..... | 40 |
| Матіко Ф. Д., Данильців Б. М. МЕТОДИКА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СТАЦІОНАРНОГО РЕЖИМУ РУХУ ГАЗУ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ..... | 46 |
| Решетило О. М. МЕТОДИ БОРОТЬБИ З БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ОПТОВОЛОКОННИЙ КАНАЛ КЕРУВАННЯ..... | 54 |
| Смолій О. В., Микитишин А. Г. ІОТ-МОНІТОРИНГ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СНЕКІВ НА ДВОШНЕКОВОМУ ЕКСТРУДЕРІ..... | 59 |
| Смолянкін О. О., Чорнобай М. О., Маркіна Л. М., Сацик В. О. РОЗРОБКА АНТРОПОМОРФНОГО МАНПУЛЯТОРА З КЕРУВАННЯМ ВІД РУКАВИЧКИ З ДАТЧИКАМИ ЗГИНУ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP32..... | 68 |
| Труфан М. М., Середюк О. Є., Пташенчук В. В., Саманів Л. В. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ОБЛІКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ПОДВІЙНОГО КОНТРОЛЮ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ | 75 |
| Яценко І. В., Антонюк В. С., Вашенко В. А., Колінько С.О., Бутенко Т. І., Цибулін В. В. ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ОПЛАВЛЕННЯ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИЛАДІВ ПРИ ПОВЕРХНЕВІЙ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ОБРОБЦІ..... | 84 |

UDK 681.518.5

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-1

Diduk V., ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-0118-2216>Kisil T., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1183-9683>Kompaniets M., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-6932-6193>

Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF AN OPTOELECTRONIC SYSTEM FOR AUTOMATED INSPECTION OF MICRODEFECTS IN LAYERS OF ADDITIVELY MANUFACTURED PARTS

The study employs a comparative analysis of non-destructive testing (NDT) methods, the theory of acoustic wave propagation to examine the limitations of ultrasonic testing (UT), and computer vision algorithms for surface defect identification. The mathematical framework is based on the evaluation of ultrasonic wave propagation velocity in anisotropic media and correlation analysis of visual descriptors associated with defects. Critical limitations of conventional ultrasonic testing for porous structures fabricated via fused deposition modeling (FDM) have been identified, primarily due to significant signal attenuation and temperature-induced drift. An integrated approach to optical inspection is proposed, enabling differentiation of defect types (warping, under-extrusion, stringing) based on their morphological characteristics without mechanical interaction with the specimen.

A hardware–software complex for optical inspection has been developed and experimentally validated. The system provides automated defect detection based on geometric and textural features, enabling a reduction in production losses within digital manufacturing processes based on additive technologies. It has been demonstrated that the implementation of an optical monitoring system allows for the identification of precision defects with a characteristic size of 0.1 mm or greater, resulting in a 15–20% reduction in production losses through real-time adjustment of printing parameters.

Keywords: *additive manufacturing, fused deposition modeling (FDM), 3D printing, defectoscopy, non-destructive testing, ultrasonic testing, artificial intelligence, surface defects, computer vision, optical monitoring.*

Problem Statement. The current stage of industrial development is characterized by the intensive integration of additive manufacturing (AM) technologies into digital production cycles. The transition to layer-by-layer object fabrication methods ensures a significant reduction in the duration of research and development (R&D) activities, as well as optimization of technological pre-production processes. According to industry analyses [1], the implementation of AM technologies enables an average increase in unit production profitability of approximately 23%, accompanied by a substantial reduction in capital expenditures required for deployment of manufacturing capacities.

Despite the rapid proliferation of 3D printing across engineering, medicine, and other domains, a critical barrier to its large-scale industrial adoption remains the instability of quality indicators of finished products. The complexity of physicochemical processes governing layer formation leads to the occurrence of specific surface and structural defects, necessitating the development of precision automated inspection systems. Therefore, the development of efficient optoelectronic defectoscopy tools constitutes a relevant scientific and engineering task aimed at ensuring the reliability and repeatability of additive manufacturing processes [2].

Analysis of Recent Research. The complexity of physicochemical processes accompanying layer-by-layer extrusion of thermoplastics results in a wide range of structural inconsistencies that significantly degrade the operational characteristics of manufactured parts [5, 7]. Studies [3, 5, 8] indicate that one of the most critical defects is interlayer delamination, caused by insufficient adhesion between consolidated layers. The primary factor underlying this phenomenon is the violation of the thermal gradient and insufficient melt temperature at the extruder, which inhibits polymer chain diffusion at the interlayer interface. As a result, localized strength degradation and the formation of interlayer cracks occur, ultimately leading to structural failure under operational loading conditions [8].

Research findings [5, 6] also confirm the significant role of defects related to geometric precision, particularly thermally induced deformation (warping). This phenomenon is attributed to the development of substantial internal stresses in the polymer during phase transitions and non-uniform crystallization. It is noted that the thermal regime is a dominant parameter: excessive material fluidity at elevated temperatures leads to the formation of material accumulation and loss of contour definition,

whereas insufficient temperature in the printing zone impedes extrusion and reduces structural isotropy [8].

In addition to macrostructural deviations, other studies [3, 4, 5] emphasize the presence of surface microdefects, such as retraction artifacts (stringing) and under-extrusion. These anomalies, caused by improper adjustment of dynamic filament feed parameters, directly reduce density, hermeticity, and aesthetic quality of the parts. The systematization of these studies indicates the necessity of developing intelligent visual inspection systems for the real-time detection of such defects.

In summary, the identified defects can be classified as follows (Table 1).

Table 1 – Classification of Defects in Additive Manufacturing Processes

| Defect Category | Occurrence Frequency (%) | Primary Factors |
|-----------------------|--------------------------|--|
| Physical (Mechanical) | 40% | Geometric deviations, surface roughness, nozzle wear |
| Thermal | 30% | Deformation (<i>warping</i>), delamination, overheating |
| Pre-processing | 20% | Slicing errors, incorrect orientation, G-code parameter misconfiguration |
| External/Random | 10% | Contamination, power supply disturbances, vibrations, humidity |

This classification confirms the necessity of developing an optical inspection system capable of identifying multimodal defect types at different stages of the fabrication process.

The primary objective of the proposed system is the defectoscopic inspection of parts while fully preserving their structural integrity and geometric parameters. Within the framework of non-destructive testing (NDT) methods, particular attention is given to ultrasonic testing (UT), whose theoretical foundations and hardware limitations require detailed analysis in the context of the stated problem. The functional advantages and limitations of ultrasonic testing for the diagnostics of additively manufactured parts were analyzed (Tables 2 and 3).

Table 2 – Functional Advantages of Ultrasonic Testing in the Diagnostics of Additively Manufactured Parts

| Parameter / Characteristic | Description of Advantages and Technical Capabilities |
|---------------------------------------|---|
| Resolution | Enables identification of precision defects (microcracks, voids, inclusions) with linear dimensions from 0.1 mm. |
| Depth Penetration Capability | High efficiency in inspecting objects of significant thickness and internal structures, exceeding classical optical vision systems. |
| Spatial Localization | Capability for precise determination of spatial coordinates, depth of occurrence, and geometric configuration of defects in 3D space. |
| Operational Efficiency and Automation | High scanning speed of large surfaces; generation of digital datasets for subsequent intelligent processing and archiving. |
| Methodological Flexibility | Adaptability in selecting techniques (pulse-echo, through-transmission, or phased array methods) depending on part geometry complexity. |
| Non-destructive Testing | Complete verification of internal structure without compromising integrity or physicomaterial properties of the object. |

The identified limitations of acoustic methods substantiate the feasibility of transitioning to non-contact optoelectronic inspection systems. The application of computer vision techniques enables real-time monitoring of surface geometry and texture without mechanical interaction with the object, ensuring a high probability of defect identification even under conditions of thermodynamic instability in the working zone.

Objective of the Study. The objective of this work is the development and experimental validation of a hardware–software complex for optical inspection that provides automated defect detection based on geometric and textural features, thereby enabling a reduction in production losses within digital manufacturing processes based on additive technologies.

Table 3 – Technical and Physical Limitations of Ultrasonic Testing for Inspection of Additively Manufactured Parts

| Limiting Factor | Description of the Issue and Its Impact on Inspection Reliability |
|-----------------------|--|
| Structural Anisotropy | The layered structure of FDM parts induces intensive scattering and attenuation of acoustic waves, reducing the signal-to-noise ratio (SNR). |
| Geometric Complexity | The presence of lattice structures and internal cavities prevents stable acoustic coupling between the transducer and the object. |
| Coupling Medium | The requirement for immersion liquids or coupling gels, which may penetrate porous polymer structures and alter their physicochemical properties. |
| Temperature Drift | The dependence of sound velocity on thermoplastic temperature complicates in-situ monitoring due to high thermal gradients within the part. |
| Signal Interpretation | The presence of technological interlayer interfaces generates multiple false echo signals, necessitating complex filtering and signal processing algorithms. |

Main Content. During the course of the study, specific boundary conditions were established under which defects associated with the pre-processing stage were excluded from consideration. Within the experimental framework, pre-print preparation conditions were assumed to be conditionally ideal, allowing the analysis to focus exclusively on internal anomalies arising directly during layer formation.

The authors propose a machine vision method based on the integration of a high-resolution camera directly into the printer architecture. The optical axis of the camera is positioned strictly perpendicular to the build surface, ensuring the acquisition of high-precision images of each intermediate layer. The result of this process is a structured dataset of images, the analysis of which enables the operator to verify structural integrity and identify latent internal defects.

The software implementation of the proposed method requires modification of motion control algorithms. To ensure unobstructed surface capture, it is necessary to move the extrusion head outside the camera field of view after the completion of each layer. In this study, the corresponding G-code configuration was implemented using the PrusaSlicer software environment. To automate the image acquisition process, the following command sequence was introduced in the “*Before layer change G-code*” section:

```
G1 X200 Y200; Move the extruder to a fixed position outside the part
G4 P500; Pause for 500 ms to stabilize the camera and suppress vibrations
; Trigger command for camera shutter activation (depending on the interface)
```

The algorithmic implementation involves modifying the control G-code such that, upon completion of each layer, the system initiates the return of the extruder to a predefined position outside the printing area. Simultaneously, the logical state of a designated GPIO pin is altered, serving as a synchronization signal between the printer control board and the image processing module. The reception of this signal acts as a trigger for image capture.

The hardware modification of the printer involves the integration of a machine vision system comprising a camera and an auxiliary computing module. The use of a dedicated microcomputer, such as the Raspberry Pi 4, is justified by the need to isolate the primary printer controller from computationally intensive media processing tasks. This approach ensures the stability and efficiency of core printing operations, as the secondary board performs parallel processing and archiving of captured images. The selection of the Raspberry Pi platform is conditioned the availability of a sufficiently powerful processor with an integrated graphics unit, adequate RAM capacity (from 2 GB), and a high clock frequency, which are critical for real-time image analysis.

When selecting an image sensor for the machine vision system, a key requirement is the ability to operate under elevated temperature conditions. Most commercially available solutions exhibit similar technical specifications but lack adequate thermal protection. For industrial additive manufacturing systems, where the temperature within the build chamber may exceed 100 °C, this constitutes a critical limitation. An effective engineering solution is the spatial decoupling of system components: relocating the electronic control module to a low-temperature zone, while placing only the optical unit (lens) within the high-temperature environment. Among available hardware solutions, the Raspberry Pi HQ Camera module is particularly suitable for implementing this architecture. This camera offers high resolution

and flexible interfacing capabilities, enabling integration into customized cooling systems or the use of extended ribbon cables to position the processing unit outside the thermal chamber.

At the stage of control program preparation (slicing), the geometry of the part is decomposed into distinct structural elements (*feature types*), classified according to their spatial arrangement. The key components include external perimeters (*external perimeter*), internal infill structures (*internal infill*), as well as solid bottom and top layers (*solid infill* and *top solid infill*) (Fig. 1).

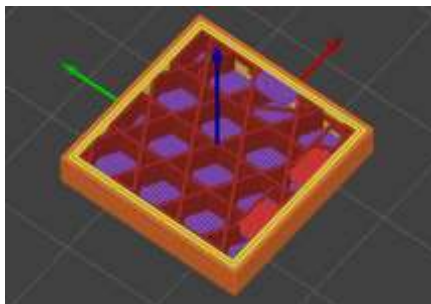


Figure 1 – Examples of Geometric Elements:

External perimeter (yellow), Internal infill (dark red), Solid infill (purple), Top solid infill (red)

The visual inspection methodology is primarily based on the analysis of the morphology of extruded filament lines (“strands”) within the specified regions. The principal quality criteria are structural homogeneity and stability of the geometric parameters of the deposited lines. In particular, a reduction in cross-sectional area or non-uniformity of the deposition pitch indicates under-extrusion, excessive cooling rates, or partial degradation of nozzle throughput (Fig. 2). Conversely, pronounced irregularity and material accumulation are indicative of over-extrusion.

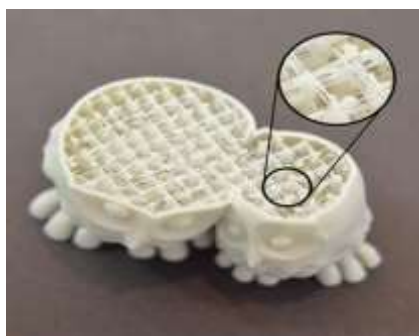


Figure 2 – Example of a Printing Defect

The identified defects have a physical origin and are caused dynamic variations in printing process parameters, including deviations of the actual filament diameter from its nominal value and changes in the hydrodynamic resistance of the nozzle (due to clogging or thermal deformation). Since direct real-time monitoring of these parameters is technically complex from a hardware perspective, the analysis of high-resolution layer-by-layer images provides a representative assessment of the stability of the technological process.

The architecture of the proposed algorithm is based on the synergy of two approaches: deterministic analysis of the control G-code and empirical training of a neural network. The use of G-code data ensures precise positioning of extrusion trajectories, which serves as a reference basis for the initial phase of artificial intelligence (AI) model training. This enables the formation of high baseline accuracy of the system, followed by iterative optimization of recognition performance during practical operation.

At the first stage of the study, a conceptual information model of the analysis system was developed, reflecting the interaction of data flows between software and hardware components (Fig. 3). Based on this model, specialized software was designed and implemented using the Python programming language. The functional algorithm of the system involves layer-by-layer analysis of part geometry with subsequent decomposition into elementary extrusion trajectories. The processing pipeline includes the generation of a reference digital representation of each layer, based on the nozzle movement coordinates.

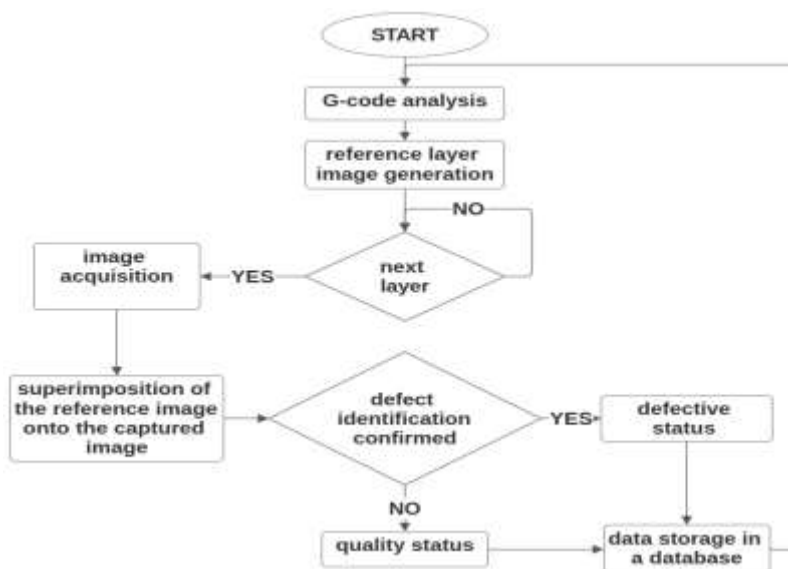


Figure 3 – Information Model of the Analysis System

The visualization results are structured into an organized array of graphical data, examples of which are presented in Fig. 4 and Fig. 5. The generated image database serves as a reference dataset for subsequent verification of the actually printed layers and for the detection of deviations from the prescribed geometric model.

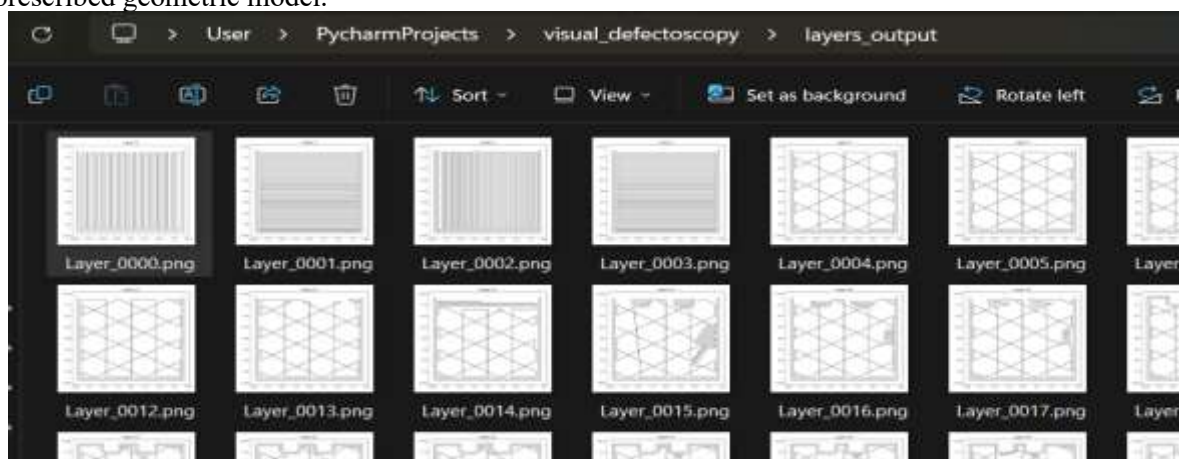


Figure 4 – Example of a Generated Directory Containing Layer Representations

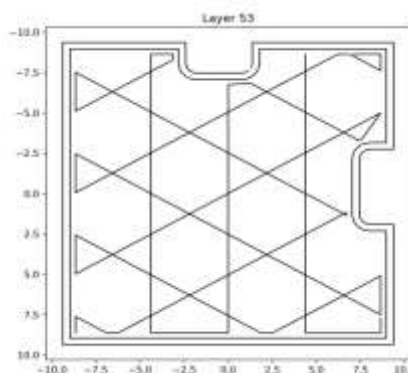


Figure 5 – Example of a Generated Layer Representation

The next stage involves a superposition operation, i.e., overlaying the reference digital layer model onto the actual image acquired by the machine vision system directly during the manufacturing process [9]. This procedure ensures spatial synchronization between the theoretical extrusion trajectories and the actual material deposition pattern, enabling precise determination of regions of interest for analysis.

The algorithm performs sequential iteration along the extrusion vector, verifying the correspondence of actual parameters to the predefined criteria (Fig. 6), including line width, structural continuity, and geometric congruence (compliance with the boundaries of the calculated trajectory). The processing result for each segment is represented as a binary evaluation: confirmation of compliance with specified tolerances (positive result) or identification of a structural anomaly classified as a manufacturing defect (negative result).

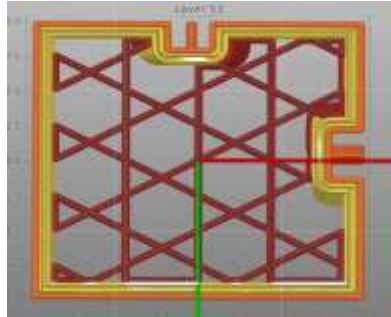


Figure 6 – Superimposed Layer Representation on a Simulated Layer Image

To validate the proposed method, an experimental setup was designed and assembled, on which a series of test runs with layer-by-layer photographic recording of the additive manufacturing process was conducted. The evaluation of the developed algorithm enabled the acquisition of empirical data regarding the accuracy of structural anomaly identification.

For comparative analysis and to illustrate the system's effectiveness, two representative samples were selected: a reference sample with parameters corresponding to the prescribed digital model (Fig. 7), and an experimental sample containing morphological defects (Fig. 8). The visualization results confirm the capability of the algorithm to clearly differentiate regions of stable extrusion from areas with geometric deviations of the layer.



Figure 7 – Defect-Free Part (Part0)



Figure 8 – Defective Part (Part1)

The generated array of images was processed using the developed algorithm, the results of which are presented in Fig. 9.

```
C:\Users\User\PycharmProjects\visual_defect
Готово! Результати аналізу:
Дефектні деталі: Part1

Process finished with exit code 0
```

Figure 9 – Obtained Results

Conclusions. The analysis procedure was performed iteratively: for each layer, a reference digital representation was generated and superimposed onto the actual photographic capture to verify extrusion lines. As a result of validation, the reference sample without structural anomalies (*Part0*) was correctly identified by the system as defect-free, confirming the validity of the baseline algorithm.

Given the complexity of unambiguous defect classification, an adaptive system training methodology is proposed, comprising the following stages:

- Sensitivity calibration: establishment of minimum deviation thresholds for detecting potential anomalies (e.g., variations in line width, structural discontinuities), followed by their classification.
- Verification and filtering: execution of mechanical testing of samples to determine the correlation between detected optical anomalies and actual physicochemical properties of the part. If nominal characteristics are preserved, recognition parameters are adjusted accordingly.
- Knowledge base formation: development of a structured dataset containing defect types and their corresponding mathematical descriptors (e.g., critical gradient of line discontinuity relative to the trajectory vector).
- Definition of admissible tolerances: determination of a relative error coefficient that defines the maximum allowable number of non-critical deviations per unit area of a layer.

Systematic training according to the proposed methodology enables minimization of Type II errors. It should be noted that the training process must be adapted to specific types of polymer materials (or their groups), as variations in texture, optical properties, and rheological behavior of different filaments significantly influence the visual characteristics of the deposited layers.

References

1. Androshchuk H.O. Adytyvni tekhnolohii: perspektyvy i problemy 3D-druku. Nauka, tekhnolohii, innovatsii. 2017. No. 1. P. 68–69. URL: https://nti.ukrintei.ua/wp-content/uploads/2018/05/2017-1_stat9_UA_povn.pdf
2. Wohlers T. *Wohlers Report 2024: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*. Wohlers Associates. 2024. URL: <https://wohlersassociates.com> (accessed: 22.02.2026).
3. Li Z., Zhang Z., Shi J., Wu D. Fault Diagnosis and In-situ Monitoring of FDM 3D Printing Based on Deep Learning. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 20. P. 7311. DOI: 10.3390/app10207311.
4. Kisil T., Bondarenko M., Nesterenko D. Modeling of the process of ultrasonic flaw detection of materials with internal microdefects of different origin. *Machines. Technologies. Materials. International Scientific Journal*. 2021. Vol. XV, Issue 1. P. 32–34. URL: <https://stumejournals.com/journals/mtm/2021/1/32.full.pdf>
5. Baturynska I. Optimization of Process Parameters for Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 72. P. 1222–1227. URL: <https://www.sciencedirect.com> (accessed: 22.02.2026).
6. Adytyvni tekhnolohii: perspektyvy i problemy 3D-druku / O. S. Stryzhak et al. *Naukovo-tekhnichna informatsiia*. 2017. No. 1. P. 43–50. URL: <http://uintei.kiev.ua> (accessed: 22.02.2026).
7. DSTU ISO/ASTM 52900:2022. Adytyvne vyrobnytstvo. Zahalni pryntsyppy. Terminolohiia. [Chynnyi vid 2022-12-01]. Kyiv: DP “UkrNDNTs”, 2022. 34 p.
8. Top pomyluk pry druku PLA i PETG. URL: <https://epic3d.com.ua/top-pomylok-pry-druku-pla-i-petg/> (accessed: 01.03.2026).
9. Brion D. A. J., Pattinson S. W., et al. Generalisable 3D printing error detection and correction via multi-head neural networks. *Nature Communications*. 2022. Vol. 13. Article number: 4857. DOI: 10.1038/s41467-022-31985-y. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-31985-y>
УДК 681.518.5

Дідук В. А., Кісіль Т. Ю., Компанієць М. Д.

Черкаський національний університет імені Б. Хмельницького, м. Черкаси, Україна

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ МІКРОДЕФЕКТІВ ПОВЕРХНІ ДРУКОВАНИХ ВУЗЛІВ

В роботі використано порівняльний аналіз методів неруйнівного контролю (НК), теорію поширення акустичних хвиль для дослідження обмежень ультразвукової дефектоскопії (УЗД) та алгоритми комп'ютерного зору для ідентифікації дефектів поверхні. Математичне моделювання базується на розрахунку швидкості поширення ультразвуку в анізотропних середовищах та кореляційному аналізі візуальних дескрипторів браку. Встановлено критичні обмеження класичної УЗД для пористих структур, виготовлених методом FDM-друку, що зумовлені високим загасанням сигналу та температурним дрейфом. Авторами запропоновано інтегрований підхід до оптичної дефектоскопії, який дозволяє диференціювати типи дефектів (*warping, under-extrusion, stringing*) за їх морфологічними ознаками без механічного впливу на виріб. Розроблено та апробовано програмно-апаратний комплекс оптичного контролю, який забезпечує автоматичне виявлення браку за геометричними та текстурними ознаками, що дозволяє знизити частку виробничих втрат у процесах цифрового виробництва на основі адитивних технологій. Доведено, що впровадження системи оптичного моніторингу дозволяє ідентифікувати прецизійні дефекти розміром від 0,1 мм, що забезпечує зниження виробничих втрат на 15-20% за рахунок оперативного коригування параметрів друку.

Ключові слова: адитивні технології, FDM-друк, 3D друк, дефектоскопія, неруйнівний контроль, ультразвукова дефектоскопія, штучний інтелект, дефекти поверхні, комп'ютерний зір, оптичний моніторинг.

Дата першого надходження
статті до видання
16.02.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
24.03.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.

UDC 621.38

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-2

Malovychko H., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3697-5920>Machulianskyi O., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0057-9844>

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

OPTICALLY SELECTIVE STRUCTURES BASED ON NANOSCALE CHROMIUM CONDENSATES FOR PHOTOTHERMAL ENERGY CONVERTERS

The results of the formation of optically selective structures with an optical selectivity ratio of up to 11.4 are presented. These structures are based on nanoscale two-phase chromium–chromium oxide condensates developed via vacuum deposition on copper substrates. A comprehensive experimental study was conducted to evaluate the composition, structure and selective optical parameters (integral, absorptance, thermal emittance, and selectivity ratio) of the test samples. The analysis of the influence of deposition process parameters for nanoscale chromium layers and substrate surface roughness on the properties of optically selective structures is provided. It was established that increasing the substrate roughness contributes to an increase in the integral emittance of the selective structures up to 0.32, which consequently reduced the optical selectivity ratio to 2.8. The results of the investigation into the stability of the selective optical parameters under elevated temperatures and ultraviolet radiation allow for the recommendation of these structures for application in photothermal converters at temperatures up to 500 K under vacuum conditions (1 Pa).

Keywords: metal-dielectric optically selective structures, nanoscale films, chromium condensates, integral solar absorptance, thermal emittance, selectivity ratio

Problem statement. An important role in addressing the efficiency of energy resource utilization through renewable energy sources, specifically solar radiation, is occupied by the development of photothermal energy converters alongside photovoltaic systems [1]. The characteristics of such converters are significantly influenced by the optical properties of the radiation-absorbing surface.

For effective solar energy conversion, the surface of a photothermal converter must possess the highest possible absorption coefficient in the solar spectral range (0.3–2.0 μm) and the lowest possible emittance in the infrared range (2–30 μm), which corresponds to its own thermal re-radiation. The conflicting requirement of creating an efficient absorber that is simultaneously a weak emitter can be satisfied by using a surface with optical selectivity. A surface with ideal spectral selectivity should exhibit a transition between regions of low and high reflectance at a wavelength of approximately 2 μm [2, 3].

Most selective absorbing surfaces for photothermal converters are formed on a metallic base. The use of metals in photothermal solar energy converters is dictated by their high reflectance in the infrared range, which ensures a low thermal emittance. High-conductivity metals, such as copper and aluminum, exhibit emittance values in the range of 0.02–0.04 at temperatures up to 300 °C. To increase the absorptance of metals in the solar spectral region, it is necessary to apply a coating that strongly absorbs solar radiation [4, 5].

It should be noted that, in addition to spectral selectivity, optically selective structures must possess high parameter stability under operational conditions and at elevated temperatures. It is noted in [6, 7] that the mechanical and chemical strength, as well as the UV stability of silver and copper materials in multilayer structures, can be enhanced by using nanoscale titanium, chromium, or chromium oxide films as intermediate layers. Coatings consisting of nanodispersed metallic inclusions distributed within a dielectric medium, or island films, are considered more promising [8, 9]. Structures containing transition metal nanoparticles are of particular interest for increasing absorptance in the visible spectral range [10]. However, the correlation between the optically selective characteristics of such metal-dielectric structures and their actual structural parameters has not been sufficiently investigated [11, 12].

Research aim and key objectives. The present work is dedicated to studying the optical properties of selective structures based on nanoscale chromium condensates and their dependence on the technological conditions of the vacuum deposition process and substrate surface roughness.

Results and Discussion. The optical and electrical properties of nanoscale condensates depend on numerous factors, including film thickness, structural morphology, grain size, and substrate

characteristics. These factors are determined by the deposition method and the specific process parameters used during formation.

To obtain experimental samples, a modernized vacuum deposition system based on the УВН-15 unit was employed. The system is equipped with sources for thermal evaporation, magnetron sputtering, and arc discharge. This setup enabled the deposition of chromium condensates using various vacuum methods to compare their features in forming nanoscale structures.

Chromium condensates produced by vacuum thermal evaporation utilized a starting material with 99.99% purity at a residual gas pressure of $(3\div 7)\times 10^{-4}$ Pa. Film deposition was performed after stabilizing the substrate temperature, which was set discretely within the range of $100\div 200^\circ\text{C}$. Following additional thermal treatment at 300°C in a vacuum (10^{-4} Pa) and subsequent cooling to room temperature, the samples were exposed to air. Heating and cooling in the vacuum chamber were conducted at a rate of $5^\circ\text{C}/\text{min}$.

For the magnetron reactive sputtering method, a chromium target (99.99% purity) was used. The process parameters were varied as follows: base pressure of 10^{-4} Pa, operating pressure of $(3\div 8)\times 10^{-1}$ Pa, discharge power from 100 to 500 W, and a magnetic induction at the target surface of 0.04 T. Typical parameters of the chromium samples relative to their deposition conditions are summarized in Table 1.

Copper plates with a thickness of 2 mm and roughness parameters Ra of 2.0 and $0.125\ \mu\text{m}$ were used as substrates. Different surface micro-reliefs were created by mechanical polishing with abrasive powders. The mass thickness of the films and the deposition rate were monitored using the quartz crystal microbalance (QCM) method. To evaluate the phase composition and structure, films were simultaneously deposited onto copper grids with a graphite underlayer and onto silicon substrates.

The microstructure of the films was investigated via electron microscopy. Electron microscopic analysis revealed that nanoscale chromium condensates with a mass thickness of approximately 2 nm possess a granular (discontinuous) structure. A continuous structure was observed with a further increase in mass thickness, correlating with data reported in [13].

The phase composition was qualitatively assessed using Infrared (IR) spectroscopy. Analysis of the IR spectra showed that chromium condensates obtained at $p = 10^{-1}$ Pa consist of chromium oxide Cr_2O_3 , whereas those obtained at $p = 10^{-4}$ Pa consist of metallic chromium. These studies suggest that the resulting chromium condensates on copper substrates are nanodispersed structures, in which metallic chromium particles are embedded within a dielectric chromium oxide matrix.

Spectral studies of nanodispersed copper, nickel, and chromium films on quartz substrates were conducted in the $0.2\div 1.1\ \mu\text{m}$ range using an СФ-16 spectrophotometer. Reflectance was measured using a П30-1 specular reflection attachment at a near-normal angle of incidence. Reflectance spectra in the $0.8\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ range were recorded using an ІКС-14 spectrophotometer, while the $2.5\text{--}25\ \mu\text{m}$ range was measured using a SPECORD-75IR spectrophotometer. The measurement error for the reflectance coefficient did not exceed $\pm 3\%$. Figures 1 and 2 illustrate the spectral dependence of the reflectance coefficient for structures based on nanoscale chromium condensates of varying thicknesses on polished copper substrates $Ra = 0.125\ \mu\text{m}$ formed via thermal evaporation and magnetron sputtering.

The efficiency of photothermal energy converters is evaluated using integral selective parameters: the integral solar absorptance A , the integral thermal emittance (degree of blackness, E), and the selectivity ratio η at a temperature of $T = 300\text{K}$.

The integral solar absorptance is determined by the following relation:

$$A = \frac{\int_0^\infty [1-R_\lambda] P_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty P_\lambda(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

where R_λ is the spectral reflectance characteristic of the structure, and P_λ is the spectral distribution of solar radiation intensity.

The integral thermal emittance (degree of blackness) at a temperature of $T = 300\ \text{K}$ is determined by the following relation:

$$E = \frac{\int_1^{10} [1-R_\lambda] W_B(\lambda, T_B) d\lambda}{\int_1^{10} W_B(\lambda, T_B) d\lambda}, \quad (2)$$

where $W_B(\lambda, T_B)$ is the spectral energy distribution of a blackbody at temperature T_B (with $T_B = 300\text{K}$).

The selectivity ratio is defined by the following expression:

$$\eta = \frac{A}{E}. \quad (3)$$

The integral selective parameters A , E , and η for the photothermal energy converter structures were determined based on the measured spectral reflectance at a normal angle of incidence for experimental samples of nanoscale chromium condensates on copper substrates.

The parameters of the resulting coatings, denoted as A_N , E_N , and η , were calculated according to the proposed algorithm using the reflectance coefficients measured at a normal angle of incidence. Examples of the developed selective structures based on chromium condensates on copper substrates, along with their corresponding optical, selective, and technological parameters, are presented in Table 1.

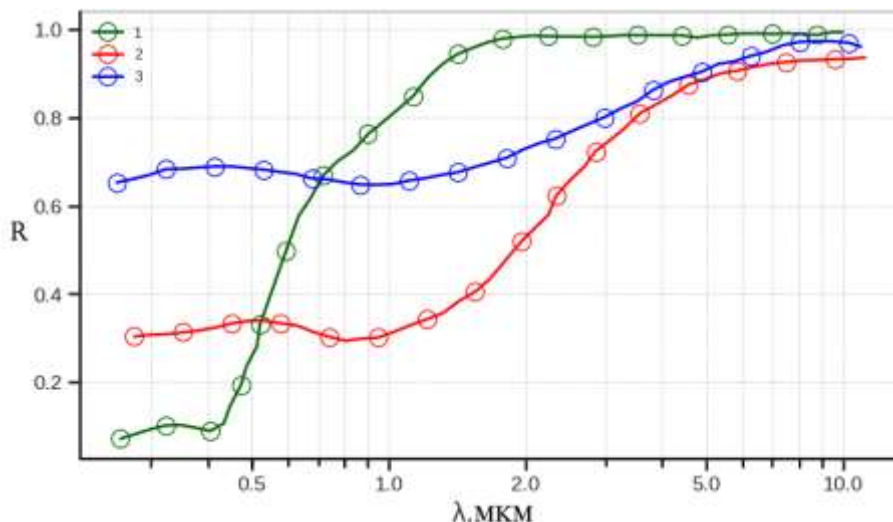


Figure 1 - Spectral reflectance of structures based on nanoscale chromium condensates on copper substrates with a roughness parameter $R_a = 0.125 \mu\text{m}$, formed by vacuum thermal evaporation with different mass thicknesses: 1 – 4.0 nm; 2 – 22.0 nm; 3 – for a model structure with bulk chromium properties according to the data from [14]

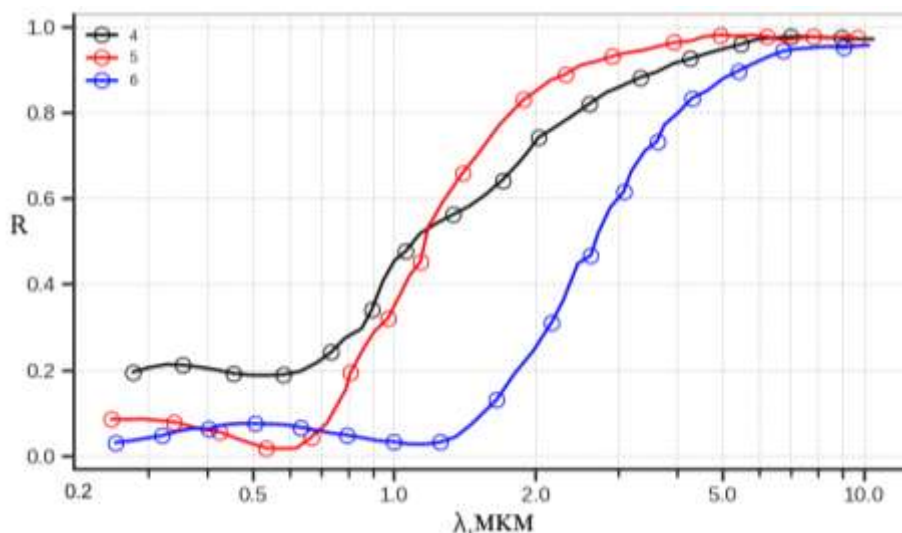


Figure 2 - Spectral reflectance of structures based on nanoscale chromium condensates on copper substrates with a roughness parameter $R_a = 0.125 \mu\text{m}$, formed by magnetron sputtering with different mass thicknesses: 1 – 7.5 nm; 2 – 14.0 nm; 3 – 53.0 nm

The variation in the mass thickness of the films from 4 to 53 nm leads to a redshift of the absorption edge toward the long-wavelength region, shifting from 0.5 μm to 2 μm for the selective structures. Consequently, for the specified film thicknesses, the integral solar absorptance increases from 0.52 to 0.91, respectively. At the same time, the thermal emittance remains low, maintaining a value of approximately 0.04.

Table 1 – Technological and optical selectivity parameters of structures based on nanoscale chromium condensates on copper substrates.

| Mass thickness, nm. | Deposition parameters | | | Substrate roughness R_a , мкм | A | E | η |
|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------------|------|------|--------|
| | Operating pressure, Па | Discharge power, Вт | Substrate temperature, °C | | | | |
| 2.0 | 10^{-4} | – | 200 | 0.125 | 0.51 | 0.04 | 12.7 |
| 4.0 | 10^{-4} | – | 100 | 0.125 | 0.52 | 0.04 | 13 |
| 6.0 | $7 \cdot 10^{-1}$ | 100 | 100 | 0.125 | 0.61 | 0.06 | 10.2 |
| 8,0 | $5 \cdot 10^{-1}$ | 200 | 100 | 0.125 | 0.64 | 0.06 | 10.7 |
| 14,0 | $7 \cdot 10^{-1}$ | 250 | 100 | 0.125 | 0.76 | 0.05 | 15.2 |
| 22,0 | 10^{-4} | – | 200 | 0.125 | 0.89 | 0.07 | 12.7 |
| 53,0 | $8 \cdot 10^{-1}$ | 100 | 200 | 0.125 | 0.91 | 0.08 | 11.4 |
| 4.0 | 10^{-4} | – | 100 | 2.0 | 0.90 | 0.31 | 2.9 |
| 8.0 | $5 \cdot 10^{-1}$ | 200 | 100 | 2.0 | 0.93 | 0.32 | 2.9 |
| 14,0 | $7 \cdot 10^{-1}$ | 250 | 100 | 2.0 | 0.93 | 0.32 | 2.9 |
| 53,0 | $8 \cdot 10^{-1}$ | 100 | 200 | 2.0 | 0.93 | 0.30 | 2.8 |

At the same time, the influence of vacuum deposition conditions on the optical properties of chromium condensates can be observed. For films with a thickness of up to 10 nm, no significant dependence of the solar absorptance on the deposition parameters was found. However, for thicknesses ranging from 10 to 53 nm and above, the integral absorptance values are lower for structures formed by vacuum thermal evaporation at $p = 10^{-4}$ Pa. Evidently, the observed variations in integral absorptance are caused by the formation of a continuous metallic chromium film, which is consistent with the results of structural and phase analyses. This is further evidenced by the increased reflectance of such films in the visible range, approaching the reflectance values of bulk metallic chromium as the thickness increases. The spectral reflectance of bulk chromium was calculated based on its optical constants reported in [14].

As is well known, the optical properties of a surface are determined by its micro-relief. Therefore, an assessment of the influence of the substrate micro-relief scale on the selective optical parameters of the coatings was conducted. As the substrate roughness parameter R_a increased from 0.125 μm to 2.0 μm , the integral absorptance showed only a slight increase. Conversely, the thermal emittance increased significantly, reaching 0.32. The research results indicate that the emittance of the investigated selective structures is independent of film thickness (within the studied range) and is entirely determined by the substrate micro-relief. This is likely explained by the fact that thin films replicate the morphology of the substrate micro-relief [13].

The application of optically selective structures in photothermal converters involves exposure to factors such as elevated temperatures and ultraviolet (UV) radiation. Consequently, the stability of the selective parameters under these conditions was investigated. The results showed that the selective parameters of the formed structures remained unchanged after exposure to temperatures up to 560 K for 8 hours followed by cooling to 300 K under vacuum ($p = 1$ Pa). Exposure to higher temperatures led to a degradation of the optical characteristics (a decrease in A_N and an increase in E_N). Furthermore, investigations into the effect of UV radiation showed that irradiating the samples in air with a mercury-quartz UV lamp had no impact on their optical properties.

Conclusion. This work presents the results of the formation and investigation of metal-dielectric optically selective structures based on nanoscale chromium condensates on copper substrates, achieving an optical selectivity ratio of up to 11.4. Nanoscale chromium condensates were deposited onto copper substrates with varying degrees of surface roughness using vacuum thermal evaporation and magnetron reactive sputtering. The deposition process involved the systematic variation of key technological parameters, including operating pressure, discharge power, and substrate temperature.

The phase composition, structure, and optical parameters of the fabricated test samples were analyzed using infrared spectroscopy, electron microscopy, and optical spectrophotometry. Based on the optical characterization results, the integral selective parameters – solar absorptance, thermal emittance, and the selectivity ratio – were determined. Comprehensive experimental investigations

established the significant influence of deposition parameters on the composition, morphology, and spectral-optical characteristics of the resulting metal-dielectric structures.

It was found that increasing the thickness of the chromium condensates up to 50 nm results in a redshift of the absorption edge in the selective structures. For structures formed on substrates with a roughness of 0.125 μm , the optical selectivity ratio increased to 11.4. Conversely, increasing the substrate roughness parameter to 2.0 μm led to a negligible increase in integral absorptance, while the thermal emittance rose to 0.32, consequently reducing the selectivity ratio to 2.8.

The stability tests of the selective parameters under elevated temperatures and ultraviolet radiation allow for the recommendation of these structures for use in photothermal converters at temperatures up to 500 K under vacuum conditions (1 Pa). These findings provide a foundation for the development and optimization of deposition technologies and further research into nanoscale optically selective structures with tailored spectral characteristics. Future research in this direction may focus on enhancing the environmental stability of such structures, particularly through the application of additional nanoscale protective layers.

References

1. Mittal N., Kumar M., Roy S. C. (eds.). *Solar Selective Absorbers: Materials, Coatings, and Applications*. CRC Press. 2024. 312 p.
2. Zhang S., Li Y., Zhang H. [et al.]. High-performance solar selective absorber based on Cr/Cr₂O₃/SiO₂ multilayer structure. *Journal of Optics*. 2023. Vol. 25(5). P. 055001. DOI: 10.1088/2040-8986/acc1b8.
3. Machulansky A., Babych B. Selective energy-saving metal-dielectric nanocomposite coatings based on copper. *Visnyk of of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Radiophysics and Electronics*. 2015. Vol. 1(24). C. 74-78.
4. Zhang S., Li Y., Zhang H. [et al.]. Chromium-based high-temperature selective solar absorber. *Optics Express*. 2024. Vol. 32(10). P. 17542–17556. DOI: 10.1364/OE.526279.
5. Faraj M. G., Ibrahim M. A., Abdulgafour H. I. [et al.]. Optical and dielectric behavior of Al/CrO₃/p-Si device. *Optical Materials*. 2024. Vol. 150. P. 115003. DOI: 10.1016/j.optmat.2024.115003.
6. Sreejith K. G., Madhavan S. S., Jayalakshmy M. S. [et al.]. Review on selective absorber coatings: A catalyst for enhanced solar energy conversion efficiency. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2024. Vol. 264. P. 112593. DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112593.
7. Kumar R., Singh A., Banerjee M. K. [et al.]. Modification of Black Chromium Coatings for Improved Corrosion Protection. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. Vol. 34(2). P. 892–904.
8. Machulianskyi O. V. Specific electric polarizability of copper nanoparticles in the optical range of the spectrum. *Microsystems, Electronics and Acoustics*. 2018. Vol. 23(2). P. 1–9. DOI: 10.20535/2523-4455.2018.23.2.130732.
9. Feng J., Wang X., Zhang L. [et al.]. Tailoring the optical properties of Cr₂O₃-based cermets for solar harvesting. *Applied Surface Science*. 2022. Vol. 585. P. 153412. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.153412.
10. Wang L., Xu T., Zhang J. [et al.]. Microstructure and Optical Properties of Black Chromium Coatings. *Coatings*. 2023. Vol. 13(5). P. 842. DOI: 10.3390/coatings13050842.
11. Machulianskyi O. V. Optical properties of nickel nanoparticles in systems with a statistically inhomogeneous structure. *Microsystems, Electronics and Acoustics*. 2018. Vol. 23(1). P. 6–15. DOI: 10.20535/2523-4455.2018.23.1.126231.
12. Machulianskyi O. V. Optical characteristics of nanodimensional particles of chrome. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2018. Vol. 257(1). P. 203–207.
13. Yakymenko Y., Machulianskyi O., Babych B. [et al.]. Metal-Dielectric Nanocomposite Structures with Definite Optical Selective Properties. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2022. Vol. 65(11). P. 587–596. DOI: 10.3103/S0735272722120044.
14. Johnson P. B., Christy R. W. Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd. *Physical Review B*. 1974. Vol. 9(12). P. 5056–5070. DOI: 10.1103/PhysRevB.9.5056

УДК 621.38

Маловичко Г. С., Мачулянський О. В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» м. Київ, Україна

**ОПТИЧНО СЕЛЕКТИВНІ СТРУКТУРИ НА ОСНОВІ НАНОРОЗМІРНИХ
КОНДЕНСАТІВ ХРОМА ДЛЯ ФОТОТЕРМІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ**

Представлено результати формування металодіелектричних оптично селективних структур з значенням критерію оптичної селективності до 11,4 на основі нанорозмірних двофазних конденсатів хром-оксид хрому методами вакуумного осадження на підкладці із міді. Проведено комплексне експериментальне дослідження складу, структури, спектральних характеристик коефіцієнта відбивання та селективно-оптичних параметрів (поглинаючої здатності, тепловипромінюючої здатності та критерій селективної) тестових зразків. Наведені результати аналізу впливу параметрів технологічних режимів осадження нанорозмірних шарів хрому та шорсткості поверхні підкладок на властивості оптично селективних структур. Встановлено, що збільшення шорсткості підкладки сприяє збільшенню значень інтегральної випромінюючої здатності селективних структур до 0,32, що зменшувало значення критерію оптичної селективності до 2,8. Результати досліджень змін оптично селективних параметрів одержаних структур до впливу підвищеної температури і ультрафіолетового випромінювання дозволяють рекомендувати їх для застосування в фототермічних перетворювачах до температури 500 о К в умовах вакууму (1 Па).

Ключові слова: металодіелектричні оптично селективні структури, нанорозмірні плівки, конденсати хрому, інтегральна поглинаюча здатність, ступінь чорноти, параметр селективності.

Дата першого надходження
статті до видання
04.03.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
21.04.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.

УДК 681.51:621.865.8

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-3

Бартков М. С., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-9206-365X>

Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна

РОЗРОБКА ТА КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО СТЕНДА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВАКУУМНИХ ЗАХОПЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Стаття присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі створення спеціалізованого дослідницького обладнання для потреб робототехніки легкої промисловості. Об'єктом розробки є автоматизований мехатронний стенд, призначений для моделювання процесів маніпулювання гнучкими плоскими деталями. У роботі детально описано конструкцію стенда, який реалізує метод вакуумного захоплення. Проведено аналіз кінематичної схеми установки, що базується на прецизійних гвинтових передачах для створення контрольованого зусилля відриву. Обґрунтовано архітектуру пневматичної системи зі стабілізацією розрідження через ресивер. Розкрито особливості побудови двоконтурної системи керування на базі мікроконтролерів, що забезпечує синхронізацію механічного руху та високошвидкісного збору даних. Наведено методику проведення багатфакторного експерименту для визначення оптимальних геометричних параметрів вакуумних присосок.

Ключові слова: *робототехніка, експериментальний стенд, вакуумний захват, мехатроніка, пневматична схема, автоматизація, взуттєва промисловість, Arduino.*

Вступ. Сучасний розвиток засобів автоматизації у легкій промисловості вимагає створення нових типів маніпуляційних систем, здатних працювати з "незручними" об'єктами. Деталі верху взуття, виготовлені з натуральної шкіри або полімерних матеріалів, мають складну морфологію поверхні, змінну та низьку жорсткість. Це робить використання стандартних вакуумних захватів неефективним без попереднього адаптування їх параметрів. Існуюча проблема полягає у відсутності інструментарію для точного вимірювання сил зчеплення присоски з матеріалом у динаміці. Статичні методи не враховують швидкість падіння вакууму при контакті з шорсткою поверхнею, що є критичним фактором при високошвидкісному сортуванні деталей. Для вирішення цієї проблеми та реалізації запатентованого способу орієнтованої подачі деталей [1] авторами було розроблено унікальний автоматизований стенд. Метою даної статті є детальний технічний опис конструкції, принципу дії та методики використання цього обладнання.

Постановка проблеми. Головним викликом при автоматизації переміщення деталей верху взуття є забезпечення надійності їх захоплення. Найбільш поширеним типом робочих органів для таких задач є вакуумні присоски. Однак ефективність їх роботи напряму залежить від герметичності контакту з поверхнею деталі. Наявність природної шорсткості, ворсистості та мікропористості, що характерно для поверхонь плоских деталей взуття, призводить до виникнення неконтрольованих витоків повітря (підсосу) через зону контакту. Теоретичні розрахунки, що використовуються для ідеальних поверхонь, не дозволяють з достатньою точністю спрогнозувати силу утримання для таких складних матеріалів. Це призводить до необхідності проведення великої кількості натурних експериментів. Використання існуючих ручних приладів для таких досліджень є неефективним через низьку точність, неможливість фіксації швидкоплинних динамічних процесів та вплив суб'єктивного фактора оператора. Тому актуальним завданням є розробка автоматизованого інструментарію, який дозволив би комплексно досліджувати взаємодію вакуумних захватів з різними матеріалами.

Аналіз останніх досліджень. Питання взаємодії пневматичних систем з матеріалами розглянуті в багатьох наукових працях. Дослідники зазначають, що сила зчеплення вакуумного захвату є функцією не лише від рівня розрідження, але й від площі плями контакту та аеродинамічного опору матеріалу. В існуючих публікаціях описано різноманітні методики тестування, проте більшість із них орієнтовані на статичні випробування. Водночас, у реальних виробничих умовах відрив деталі часто відбувається в динаміці – при прискоренні маніпулятора. Відсутність доступних автоматизованих стендів, здатних моделювати такі умови та синхронно реєструвати параметри тиску і сили, стримує розробку адаптивних захватних пристроїв.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є опис конструкції та принципу дії розробленого автоматизованого експериментального стенда, призначеного для визначення

оптимальних геометричних параметрів вакуумних присосок шляхом дослідження динаміки їх взаємодії з поверхнями взуттєвих матеріалів.

Загальна концепція та компонування станда. Розроблений стенд являє собою настільний лабораторний комплекс, що поєднує механічну, пневматичну та електронну підсистеми. Його загальний вигляд представлено на рис. 1.

Установка змонтована на жорсткій основі з композитного матеріалу, що гасить вібрації від роботи двигунів. Компонування є симетричним відносно центральної осі, де розміщено вузол фіксації зразка (13). Основна ідея конструкції полягає у моделюванні "змагання" двох присосок (10 і 11). У реальному технологічному процесі сортування деталь затискається між двома захоплювальними органами, і після їх синхронного розведення залишається на тому, де сила присмоктування вища (тобто на поверхні з меншою шорсткістю). Фізична суть цього явища базується на різниці ефективних площ контакту: на гладкій стороні ущільнювальна юбка присоски забезпечує кращу герметизацію, мінімізуючи витоки повітря, що призводить до глибшого вакууму. Натомість, на ворсистій або шорсткій стороні нерівності на поверхні деталі створюють в зоні контакту з присоскою підсмоктування повітря в порожнині присоски, що знижує силу утримання. Спроектований стенд дозволяє не лише моделювати цю ситуацію, але й кількісно оцінити величину «селективності» захоплення – різницю сил утримання F . Це дає змогу експериментально підібрати такі параметри пневматичної системи (діаметр дроселя, швидкість відкачки), за яких ця різниця буде максимальною, що гарантує безпомилкове сортування деталей у промислових умовах. Загальний вигляд реалізованої установки з позначенням основних вузлів наведено на рис. 1.

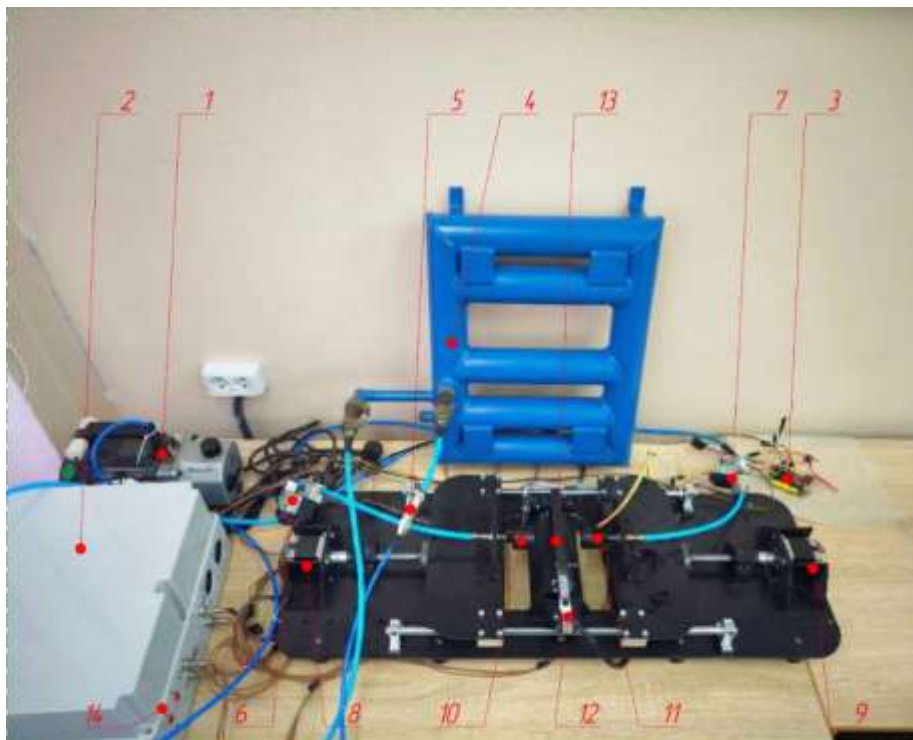


Рисунок 1 – Загальний вигляд та компонування автоматизованого станда: 1 – вакуумний насос; 2 – блок керування (Arduino Mega); 3 – блок збору даних (Arduino Uno); 4 – ресивер; 5 – зворотний клапан; 6, 7 – електромагнітні клапани; 8, 9 – крокові двигуни; 10, 11 – присоски з датчиками; 12 – тензодатчик; 13 – зона фіксації зразка; 14 – панель оператора

Аналіз кінематичної схеми. Механічна частина станда відповідає за створення навантаження на розрив або зсув. Кінематична схема (рис. 2) розроблена з урахуванням вимог до точності позиціонування та стабільності швидкості.

Рушійним елементом є крокові двигуни (поз. 1 на схемі, NEMA 23). Вибір крокових двигунів замість колекторних обумовлений необхідністю точного програмного керування переміщенням без використання складних систем зворотного зв'язку по положенню. Обертальний момент передається через пружну муфту (2) на ходовий гвинт (4). Пара "гвинт-гайка" (5) перетворює обертання у поступальний рух каретки з присоскою (6).

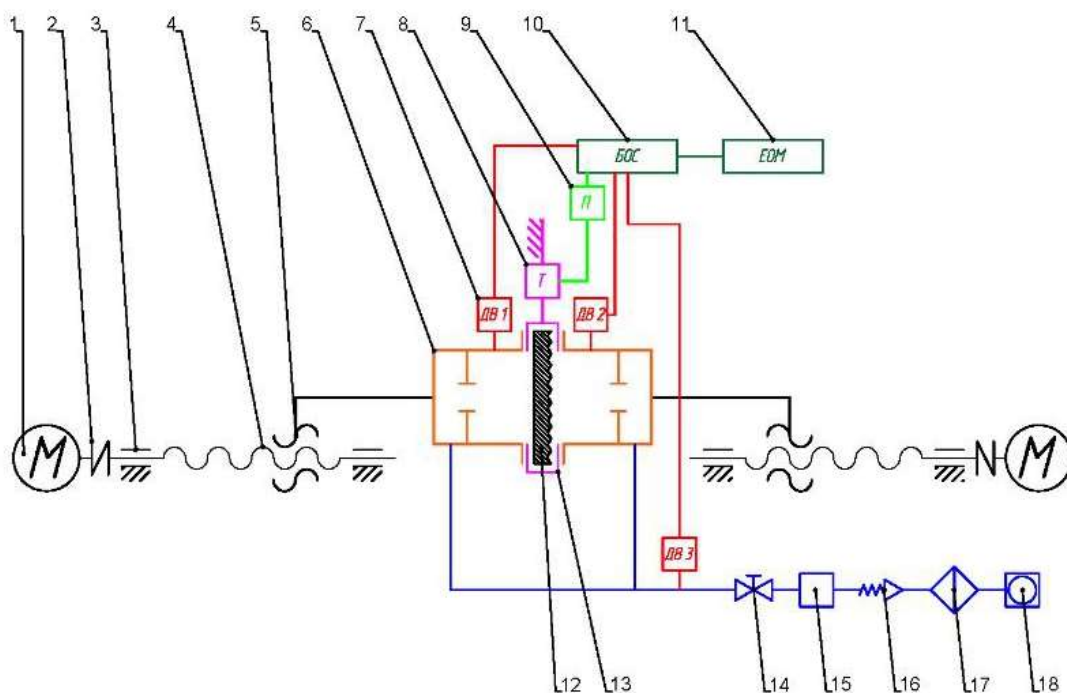


Рисунок 2 – Принципова кінематико-пневматична схема станда: 1 – кроковий двигун (привід); 2 – пружна муфта; 3 – підшипниковий вузол; 4 – ходовий гвинт; 5 – гайка передачі; 6 – вакуумна присоска; 7 – датчики вакууму (ДВ1, ДВ2 – у камерах присосок, ДВ3 – у магістралі); 8 – тензометричний датчик сили (Т); 9 – підсилювач сигналу тензодатчика (П); 10 – блок обробки сигналів (БОС / Arduino Uno); 11 – електронна обчислювальна машина (ЕОМ / ПК); 12 – досліджувана деталь; 13 – рамка фіксації зразка; 14 – електромагнітний клапан; 15 – ресивер; 16 – зворотний клапан; 17 – фільтр очистки повітря; 18 – вакуумний насос

Інженерне обґрунтування використання гвинтової передачі:

1. Високе зусилля: Гвинтова передача працює як силовий редуктор. Це дозволяє компактним двигунам створювати осьове зусилля до 200 Н, що необхідно для відриву потужних вакуумних присосок великого діаметра.

2. Самогальмування: Завдяки куту підйому різьби, передача є самогальмівною. Це означає, що при знеструмленні двигунів каретки не роз'їдуться під дією пружності матеріалу чи залишкового вакууму. Це критично важливо для проведення статичних випробувань на "повзучість".

3. Плавність ходу: На відміну від пневмоциліндрів, гвинтова передача забезпечує ідеально рівномірний рух без ривків, що дозволяє отримувати чисті графіки з тензодатчика без інерційних шумів.

Архітектура пневматичної системи. Пневматична підсистема (сині лінії на схемі) відповідає за створення, стабілізацію та розподіл вакууму. Джерелом розрідження є пластинчато-роторний насос (18). Оскільки насоси такого типу створюють пульсуючий потік, у систему інтегровано ресивер (15) об'ємом 2 літри.

Функції ресивера:

- Згладжування пульсацій тиску (стабілізація рівня вакууму).
- Створення буферного об'єму для забезпечення режиму "ударного вакууму" – миттєвої подачі максимального розрідження в момент відкриття клапанів, що імітує реальну роботу швидкодіючих роботів.

Керування потоками здійснюється електромагнітними клапанами (14) прямої дії. Система вимірювання тиску: Стенд оснащено розгалуженою системою сенсорів. Датчик ДВ3 вимірює тиск у загальній магістралі (вхідний потенціал), тоді як датчики ДВ1 та ДВ2 встановлені безпосередньо в камерах присосок.

Електронна система керування та збору даних. Для забезпечення автономності та високої швидкодії було розроблено двоконтурну систему керування, структура якої наведена на рисунку 3.

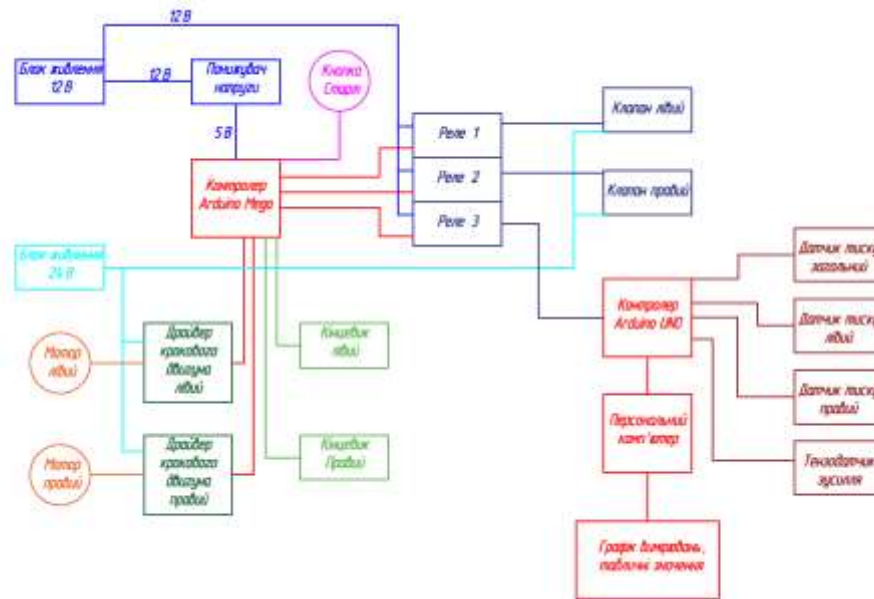


Рисунок 3 – Блок-схема електричних з'єднань.

Система розділена на два рівні:

Рівень керування: Реалізований на мікроконтролері Arduino Mega. Цей контролер відповідає за логіку роботи механізмів. Він генерує послідовності імпульсів для драйверів двигунів (забезпечуючи синхронний або роздільний рух кареток) та керує релейним модулем, який комутує силові клапани.

Рівень вимірювання: Реалізований на мікроконтролері Arduino Uno. Його задача – безперервне опитування датчиків. Arduino Uno зчитує аналогові сигнали з датчиків тиску та цифровий сигнал з підсилювача тензодатчика HX711.

Синхронізація: Між контролерами реалізовано апаратний інтерфейс синхронізації. Коли Arduino Mega починає активну фазу експерименту (відкриває вакуум або вмикає двигуни), вона подає логічний сигнал на вхід переривання Arduino Uno. Це ініціює запис даних. Такий підхід гарантує, що часова шкала на графіках тиску і сили буде ідеально синхронізована з початком фізичного процесу.

Методика експериментальних досліджень. Розроблений стенд є універсальним інструментом. Основна методика досліджень полягає у визначенні впливу геометричних параметрів присоски на силу утримання.

Для цього застосовується план повного факторного експерименту. Змінними факторами виступають параметри змінних робочих органів (присосок):

- X1 – Діаметр дросельного отвору (мм). Визначає динаміку наростання вакууму та чутливість до витоків.
- X2 – Внутрішній діаметр (мм).
- X3 – Зовнішній діаметр (мм). Різниця (X3 - X2) визначає площу ущільнювальної юбки.

Матриця планування (таблиця 1) передбачає проведення серії з 15 дослідів для різних комбінацій факторів.

Алгоритм проведення дослідів:

1. Встановлення присосок з параметрами згідно з планом.
2. Закріплення зразка матеріалу (наприклад, шкіра ВРХ) у тензометричну рамку.
3. Запуск автоматичного циклу:
 - зведення кареток до контакту з матеріалом.
 - відкриття клапанів (подача вакууму).
 - витримка часу t для стабілізації тиску.
 - розведення кареток з заданою швидкістю V .
 - фіксація моменту відриву.
4. Збереження масиву даних на ПК.

Програмне забезпечення та обробка даних. Для взаємодії з оператором та візуалізації процесів розроблено програмне забезпечення на мові Python. Скрипт виконує такі функції:

Таблиця 1 – Матриця планування експерименту

| X1 | X2 | X3 |
|-----|------|------|
| 3.0 | 25.0 | 35.0 |
| 3.0 | 15.0 | 35.0 |
| 1.0 | 25.0 | 35.0 |
| 1.0 | 15.0 | 35.0 |
| 2.0 | 20.0 | 35.0 |
| 3.0 | 20.0 | 40.0 |
| 3.0 | 20.0 | 30.0 |
| 1.0 | 20.0 | 40.0 |
| 1.0 | 20.0 | 30.0 |
| 2.0 | 20.0 | 35.0 |
| 2.0 | 25.0 | 40.0 |
| 2.0 | 25.0 | 30.0 |
| 2.0 | 15.0 | 40.0 |
| 2.0 | 15.0 | 30.0 |
| 2.0 | 20.0 | 35.0 |

- Зчитування потоку даних з СОМ-порту.
- Фільтрація шумів тензодатчика (медіанний фільтр).
- Побудова графіків у реальному часі та автоматичний розрахунок максимальної сили відриву (F) та залишкового тиску в момент відриву.

Аналіз отриманих поверхонь відгуку дозволяє знайти таку конфігурацію присоски, яка забезпечує максимальну різницю сил утримання між лицьовою та виворітною стороною матеріалу, що є необхідною умовою для надійного автоматичного сортування.

Висновок. Розроблено конструкцію та виготовлено діючий зразок автоматизованого станда, що дозволяє моделювати динамічні процеси вакуумного захоплення шорстких матеріалів. Використання гвинтових передач та жорсткої рами забезпечило високу точність позиціонування та відсутність паразитних коливань при вимірюванні сил. Впровадження пневматичної схеми з ресивером та диференціальним вимірюванням тиску дозволило дослідити вплив шорсткості матеріалу на ефективність захоплення. Двоконтурна система керування забезпечила надійну синхронізацію механіки та вимірювального тракту, що дозволяє отримувати високоточні експериментальні дані для проектування робототехнічних систем легкої промисловості.

Інформаційні джерела

1. Спосіб орієнтованої подачі на обробку плоских деталей... з пристроєм переорієнтації: пат. 160149 Україна: МПК В65Н 3/64 / Кармаліта А.К., Пундик С.І., Бартков М.С.; заявник Хмельницький нац. ун-т. № u202500915; заявл. 03.03.2025; опубл. 06.08.2025, Бюл. № 32.
2. Monk S. Programming Arduino: Getting Started with Sketches. McGraw-Hill Education, 2016.

UDC 681.51:621.865.8

Bartkov M.

Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

DEVELOPMENT AND DESIGN-TECHNOLOGICAL FEATURES OF AN AUTOMATED STAND FOR RESEARCHING VACUUM GRIPPING SYSTEMS

The article is devoted to solving the urgent scientific and practical problem of creating specialized research equipment for the needs of light industry robotics. The object of development is an automated mechatronic stand designed for modeling the processes of manipulating flexible flat parts. The work describes in detail the design of the stand, which implements the vacuum gripping method. The kinematic scheme of the installation based on precision screw gears for creating a controlled separation force is analyzed. The architecture of the pneumatic system with vacuum stabilization through the receiver is substantiated. The features of building a dual-circuit control system based on microcontrollers are disclosed, which provides synchronization of mechanical movement and high-speed data collection. The methodology for conducting a multifactor experiment to determine the optimal geometric parameters of vacuum suction cups is presented.

Key words: robotics, experimental stand, vacuum gripper, mechatronics, pneumatic scheme, automation, shoe industry, Arduino.

Дата першого надходження
статті до видання
11.03.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
27.04.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.

УДК 004.93:620.17:678.06

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-4

Денисюк В. Ю., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9268-5489>

Луцький національний технічний університет

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ КЛІМАТИЧНИМИ ВИПРОБУВАННЯМИ ГУМОТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО ЗОРУ

У роботі розглянуто проблему підвищення ефективності кліматичних випробувань гумотехнічних виробів (ГТВ), що піддаються впливу агресивних факторів зовнішнього середовища, зокрема температури, вологості, озону та ультрафіолетового випромінювання. Встановлено, що існуючі методи контролю стану зразків у кліматичних камерах характеризуються дискретністю, суб'єктивністю та недостатньою точністю, що ускладнює дослідження динаміки процесів старіння. Проаналізовано сучасні підходи до проведення кліматичних випробувань і методи машинного зору для виявлення дефектів поверхні матеріалів. Обґрунтовано доцільність інтеграції методів комп'ютерного зору в автоматизовані системи управління випробуваннями. Запропоновано структуру автоматизованої системи управління кліматичними випробуваннями ГТВ, яка включає підсистему динамічного фотоаналізу стану зразків. Розроблено підходи до збору, обробки та аналізу графічної інформації, що дозволяють здійснювати кількісну оцінку ступеня та характеру старіння на основі параметрів тріщиноутворення та зміни поверхні матеріалу. Реалізація запропонованого підходу забезпечує безперервний моніторинг процесу старіння, зменшення впливу людського фактору та підвищення об'єктивності результатів випробувань. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації режимів кліматичних випробувань і вдосконалення рецептур умових матеріалів.

Ключові слова: гумотехнічні вироби, кліматичні випробування, старіння полімерів, машинний зір, обробка зображень, автоматизована система управління, тріщиноутворення.

Постановка проблеми. Під впливом кліматичних факторів, таких як кисень, озон, світлове випромінювання, температура та вологість, відбувається поступове старіння гумотехнічних виробів (ГТВ), що супроводжується погіршенням їх фізико-механічних властивостей і призводить до руйнування матеріалу. У зв'язку з цим важливим етапом розробки нових рецептур ГТВ та контролю якості існуючих виробів є проведення кліматичних випробувань, спрямованих на оцінку стійкості матеріалів до дії факторів старіння.

Сучасні кліматичні камери дозволяють моделювати експлуатаційні умови та забезпечують автоматизоване керування параметрами середовища. Однак контроль стану зразків у процесі випробувань залишається недостатньо автоматизованим і, як правило, здійснюється оператором візуально або з використанням обмеженого набору інструментальних засобів у дискретні моменти часу. Такий підхід є суб'єктивним, трудомістким і не забезпечує безперервного моніторингу процесів старіння [1].

Водночас сучасні досягнення в галузі машинного зору та обробки зображень відкривають можливості для автоматизованого аналізу змін поверхні матеріалів, зокрема виявлення тріщин, дефектів та інших ознак деградації. Проте їх інтеграція у системи управління кліматичними випробуваннями ГТВ залишається обмеженою, що стримує підвищення ефективності та точності оцінювання процесів старіння [2, 3].

Проблема дослідження. Незважаючи на наявність значної кількості методів і алгоритмів машинного зору для розпізнавання дефектів поверхні матеріалів, їх практичне застосування у процесах кліматичних випробувань ГТВ є обмеженим. Основною причиною цього є відсутність спеціалізованого алгоритмічного забезпечення, адаптованого до особливостей процесів старіння ГТВ, які характеризуються складною фізичною природою, багатофакторністю впливів та різноманіттям форм прояву руйнування [4].

Додатковими ускладненнями є необхідність обробки великих обсягів графічної інформації, забезпечення коректної прив'язки аналізованих ділянок поверхні, усунення оптичних артефактів, а також встановлення кількісних залежностей між візуальними ознаками руйнування та фактичним ступенем старіння матеріалу.

Таким чином, існує науково-технічна проблема, що полягає у відсутності ефективних

методів і засобів автоматизованої оцінки ступеня та характеру старіння гумотехнічних виробів у процесі кліматичних випробувань на основі аналізу зображень. Розв'язання цієї проблеми потребує розробки комплексної автоматизованої системи управління кліматичними випробуваннями, яка інтегрує методи машинного зору, алгоритми обробки зображень та підсистеми підтримки прийняття рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика дослідження процесів старіння полімерних матеріалів, зокрема гумотехнічних виробів, широко представлена у наукових працях вітчизняних і зарубіжних авторів. Значна увага приділяється вивченню механізмів деградації матеріалів під впливом кліматичних факторів, розробці методів прискорених випробувань та оцінці зміни фізико-механічних властивостей ГТВ у процесі експлуатації [5, 6, 7].

У роботах, присвячених кліматичним випробуванням, розглядаються питання моделювання умов старіння за допомогою кліматичних камер, а також методи контролю параметрів середовища. Водночас більшість існуючих підходів орієнтована на контроль зовнішніх впливів, тоді як оцінка стану зразків часто залишається дискретною та виконується із залученням оператора [1, 8, 9].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із застосуванням методів комп'ютерного зору та обробки зображень для виявлення дефектів поверхні матеріалів. Запропоновано численні алгоритми сегментації зображень, виділення контурів, текстурного аналізу та класифікації дефектів із використанням методів машинного навчання та глибоких нейронних мереж. Такі підходи успішно застосовуються у задачах неруйнівного контролю, діагностики матеріалів і технічного зору в промисловості [2, 3, 10, 11, 12].

Разом з тим, аналіз наукових джерел показує, що існуючі методи машинного зору здебільшого не адаптовані до специфіки процесів старіння ГТВ у кліматичних камерах, які характеризуються динамічністю змін, варіативністю форм дефектів та впливом оптичних перешкод. Недостатньо дослідженими залишаються питання інтеграції підсистем збору та обробки графічної інформації в контур управління кліматичними випробуваннями, а також розробки алгоритмів кількісної оцінки ступеня старіння на основі аналізу зображень.

Таким чином, існує потреба у розробці комплексного підходу, що поєднує методи машинного зору, математичного моделювання та автоматизованого управління для підвищення ефективності кліматичних випробувань гумотехнічних виробів.

Мета роботи – підвищення ефективності та об'єктивності кліматичних випробувань гумотехнічних виробів шляхом розробки автоматизованої системи управління, що базується на використанні методів машинного зору для безперервного моніторингу, аналізу та кількісної оцінки ступеня і характеру старіння матеріалу в умовах дії кліматичних факторів.

Викладення основного матеріалу. На сучасному етапі цикл випробувань зразків ГТВ на стійкість до процесів старіння включає низку послідовних етапів [1]. На початковій стадії здійснюється визначення вихідних механічних характеристик зразка, що дозволяє сформулювати базовий рівень для подальшого порівняльного аналізу. Після цього зразок розміщується у робочій зоні кліматичної камери (КК), де створюються регламентовані умови впливу.

Основним етапом випробувань є проведення циклу прискореного старіння, що передбачає комплексний вплив руйнівних факторів, зокрема підвищеної температури, вологості, ультрафіолетового випромінювання, озону та інших агресивних середовищ. Після завершення експозиції зразок вилучається з камери, і проводиться його візуальне обстеження з метою виявлення ознак деградації (утворення тріщин, зміна кольору, втрата еластичності тощо), а також інструментальна оцінка пошкоджень.

Наступним кроком є повторне визначення механічних показників, що дає змогу оцінити зміну властивостей матеріалу внаслідок старіння. На основі отриманих даних обчислюються кількісні показники старіння, після чого особа, яка приймає рішення (ОПР), формує висновки щодо експлуатаційної придатності матеріалу та надає рекомендації стосовно коригування рецептури або умов проведення подальших випробувань (наприклад, при дослідженні циклічного комбінованого впливу факторів). Таким чином, існуючу методику лабораторних випробувань ГТВ доцільно розглядати як складну інформаційно-вимірну систему, яка складається з взаємопов'язаних елементів: замовника, випробувальної лабораторії, нормативної бази (стандарти ДСТУ, ISO) та бази знань щодо механізмів руйнування гумових матеріалів (рис. 1). У ролі замовника можуть виступати як промислові підприємства, що займаються виробництвом ГТВ, так і науково-дослідні установи, орієнтовані на створення нових композицій гум або вдосконалення існуючих матеріалів.

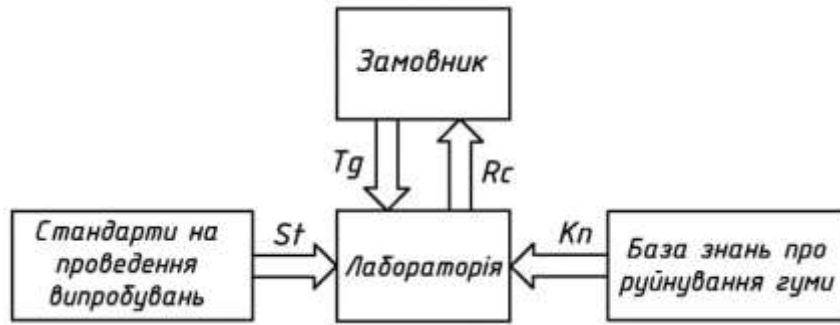


Рисунок 1 – Структурна схема взаємодії елементів, які здійснюють процес випробування ГТВ

Для ініціювання випробувань замовник передає до лабораторії заявку, дослідний зразок та сукупність супровідної інформації, яку формалізовано у вигляді множини Tg :

$$Tg = \{R, T, D, Obj\}, \quad (1)$$

де R – рецептура зразка ГТВ;

T – заявка на проведення випробування, що містить основну мету експериментальних досліджень;

D – інші відомі дані про випробовувальний зразок ГТВ; Obj – об'єкт дослідження.

Нормативні документи формують множину правил St , що регламентують умови, методи та критерії проведення випробувань. Водночас база знань Kn акумулює емпіричні та теоретичні відомості про процеси старіння гумових матеріалів залежно від їх складу, типу каучуку та використаних наповнювачів. Ключовим елементом системи є лабораторія, в межах якої функціонують такі підсистеми, як кліматична камера та підсистема прийняття рішень (ОПР). Саме тут реалізується повний цикл експериментальних досліджень.

На рисунку 2 представлено структурно-функціональну схему процесу виконання випробування ГТВ на стійкість до факторів старіння, де кожному суб'єкту та об'єкту відповідає набір виконуваних дій. Послідовність дій відповідає напрямку стрілок.

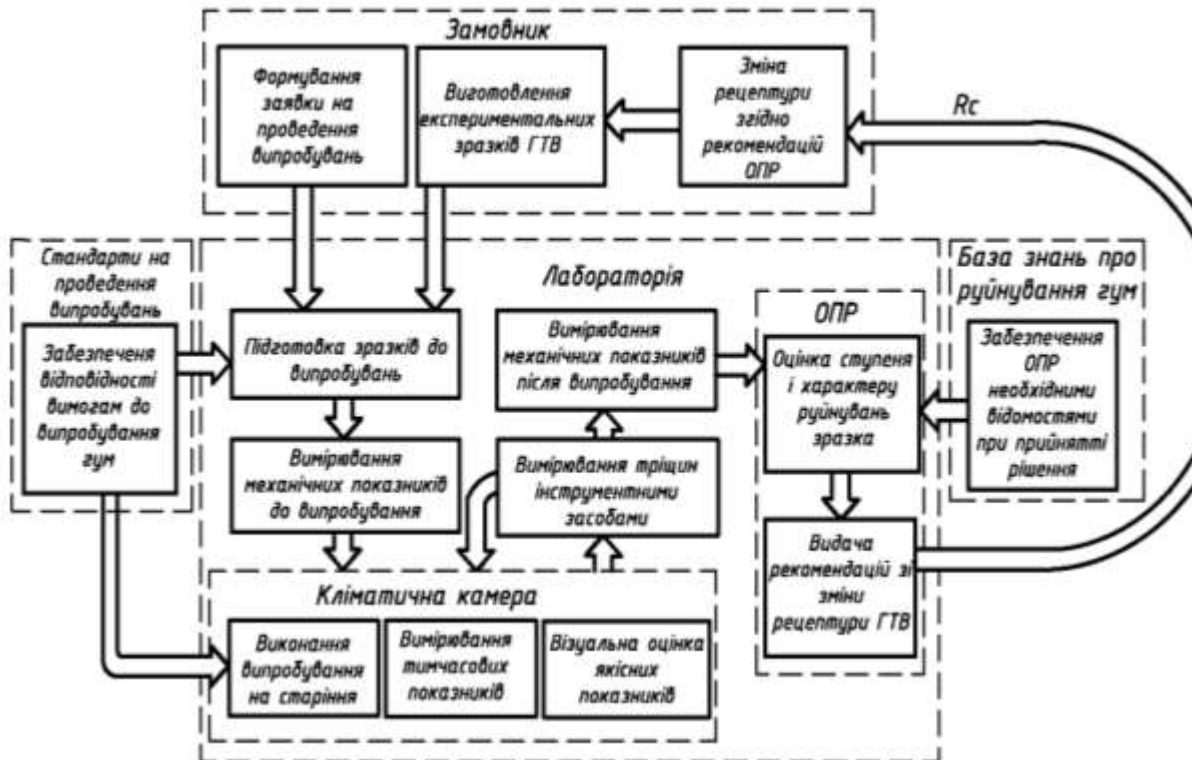


Рисунок 2 – Структурно-функціональна схема процесу випробувань ГТВ на стійкість до факторів старіння

На етапі підготовки зразків здійснюється їх калібрування та первинне вимірювання механічних характеристик відповідно до обраної методики. Далі зразки піддаються штучному старінню в кліматичній камері протягом заданого інтервалу часу. У процесі випробувань фіксуються часові параметри деградації, зокрема час до появи перших тріщин t_{nm} та час до повного руйнування t_{pz} , а також проводиться якісна візуальна оцінка.

Після завершення циклу старіння виконуються вимірювання геометричних параметрів дефектів (довжини, ширини, глибини тріщин) за допомогою простих вимірювальних засобів. За необхідності зразок може бути повторно підданий впливу або переданий на додаткові механічні випробування.

Кількісна оцінка ступеня старіння здійснюється шляхом розрахунку коефіцієнта кліматичного старіння:

$$K_{cm} = \frac{A_0}{A_1}, \quad (2)$$

де A_0 – значення показника до випробування на старіння;

A_1 – значення показника після випробування на старіння.

На основі цього коефіцієнта, а також аналізу морфології пошкоджень, ОПР формує рекомендації R_c щодо модифікації рецептури гумової суміші з метою підвищення її експлуатаційних характеристик. Разом з тим, слід зазначити, що існуюча методика має ряд обмежень, пов'язаних із труднощами дослідження динаміки процесів старіння в реальному часі, суб'єктивністю візуальної оцінки та недостатньою точністю вимірювання параметрів дефектів. Це обумовлює необхідність модернізації підходів до проведення кліматичних випробувань шляхом впровадження сучасних інформаційно-вимірювальних систем, зокрема засобів комп'ютерного зору та цифрової обробки зображень.

З метою формування вихідних даних для розроблення автоматизованої системи контролю візуальних показників старіння ГТВ було проведено серію експериментальних досліджень. У ході експериментів здійснювалося штучне та природне старіння зразків, виготовлених із гум різних рецептур (рис. 3), під впливом комплексу метеорологічних факторів: температури, сонячного випромінювання, вологості та атмосферних забруднень (озону, оксидів азоту).

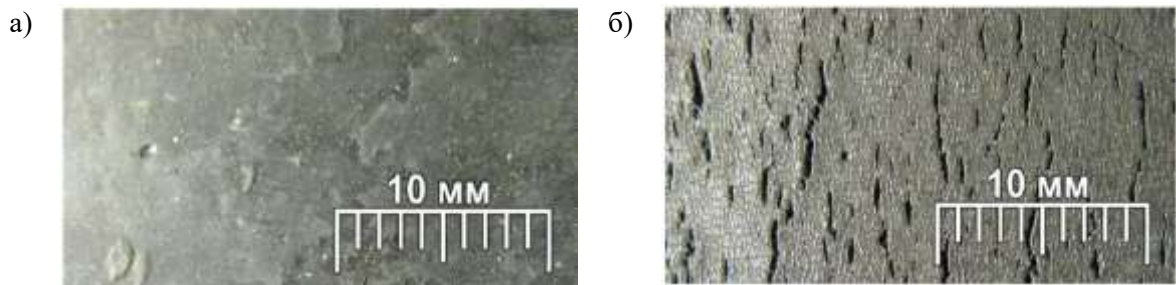


Рисунок 3 – Фотографія робочої ділянки зразка: а) до проведення випробувань; б) після проведення випробувань

У результаті експериментів було отримано серії цифрових зображень зразків вулканізаторів із різним вмістом наповнювачів. Фотозйомка виконувалася за допомогою камери Canon PowerShot A720 IS. Для забезпечення можливості переходу від піксельних координат до метричних величин додатково проводилася зйомка калібрувальної шкали (лінійки), розміщеної поруч із зразками. Отримані експериментальні дані стали основою для розроблення та апробації алгоритмів обробки зображень, спрямованих на автоматизоване визначення параметрів дефектів та кількісну оцінку ступеня старіння гумотехнічних виробів.

Аналіз існуючих підходів до проведення кліматичних випробувань ГТВ, а також узагальнення експериментальних результатів свідчать, що оцінювання ступеня та характеру розтріскування поверхні зразків у динаміці здебільшого має суб'єктивний характер і супроводжується значною похибкою. Це обумовлено залежністю результатів від кваліфікації дослідника, умов спостереження та відсутністю уніфікованих кількісних критеріїв.

З метою підвищення об'єктивності та відтворюваності результатів доцільним є впровадження оптичних та оптико-електронних засобів реєстрації, зокрема цифрових фотокамер або відеосистем, які забезпечують фіксацію стану поверхні зразків із заданою часовою дискретністю. Це дозволяє формувати послідовність зображень, що відображає еволюцію

процесів старіння ГТВ у реальному або квазі-реальному часі. Структурна схема модифікованої автоматизованої системи управління кліматичними випробуваннями ГТВ з використанням підсистеми динамічного фотоаналізу показників старіння ГТВ представлена на рисунку 4.

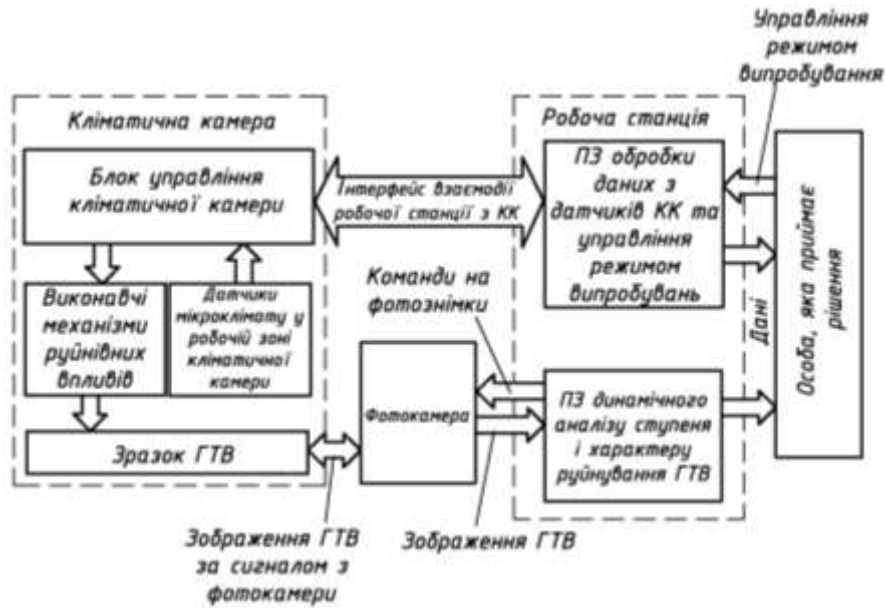


Рисунок 4 – Структурна схема модифікованої автоматизованої системи управління кліматичними випробуваннями ГТВ

Отримані зображення передаються на робочу станцію, де за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення здійснюється їх автоматизована обробка, аналіз та візуалізація (рис. 5). У результаті формується інформаційна база для підтримки прийняття рішень особою, яка керує процесом випробувань (ОПР), зокрема щодо коригування режимів роботи кліматичної камери (КК) або оптимізації рецептури матеріалу.

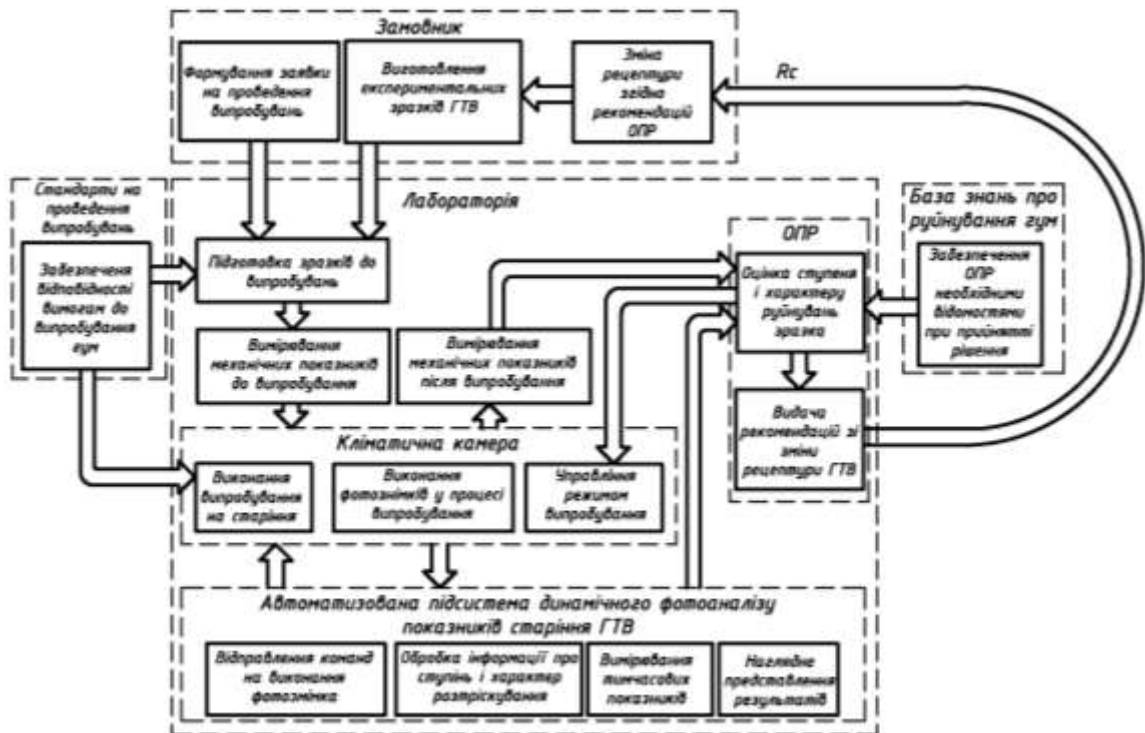


Рисунок 5 – Структурно-функціональна схема процесу випробувань ГТВ на стійкість до факторів старіння з впровадженням автоматизованого динамічного фотоаналізу показників старіння ГТВ

Запропонована модифікація системи випробувань передбачає інтеграцію підсистеми динамічного фотоаналізу (ПДФА) у загальну структуру автоматизованої системи управління (АСУ) кліматичними випробуваннями. Це дозволяє автоматизувати процес моніторингу стану зразків, зменшити вплив людського фактору та забезпечити безперервний контроль показників старіння.

У модифікованій структурі фотокамера інтегрується безпосередньо у підсистему кліматичної камери, що забезпечує автоматизоване отримання зображень без втручання оператора. Отримані дані піддаються попередній обробці (фільтрації шумів, корекції освітлення, підвищенню контрасту), після чого виконуються процедури виділення інформативних ознак старіння, таких як площа та щільність тріщин, їх геометричні параметри, а також показники деформації зразка.

Використання візуальних показників для розрахунку коефіцієнта кліматичного старіння $K_{ст}$ (зокрема за зміною площі розтріскування або лінійних деформацій) у ряді випадків дозволяє частково або повністю відмовитися від проведення механічних випробувань, що значно спрощує експериментальний процес та зменшує його тривалість.

Ключовою перевагою розробленої методики є можливість оперативного коригування параметрів випробувань завдяки безперервному отриманню інформації про стан зразка, що забезпечує підвищення точності та ефективності досліджень.

Для реалізації підсистеми динамічного фотоаналізу у кліматичній камері можуть застосовуватися різні варіанти розміщення оптичних засобів реєстрації, вибір яких визначається конструктивними особливостями КК, умовами експлуатації та вимогами до якості зображень. Для забезпечення стабільної якості зображень у всіх варіантах доцільно застосовувати додаткові джерела освітлення із контрольованими спектральними характеристиками та рівномірним розподілом світлового потоку.

На основі розглянутих технічних рішень розроблено структурно-функціональну схему автоматизованої системи управління кліматичними випробуваннями ГТВ, що включає підсистему динамічного фотоаналізу (рис. 6). У такій системі реалізовано інтеграцію вимірювальних, керуючих та аналітичних компонентів у єдине інформаційне середовище.

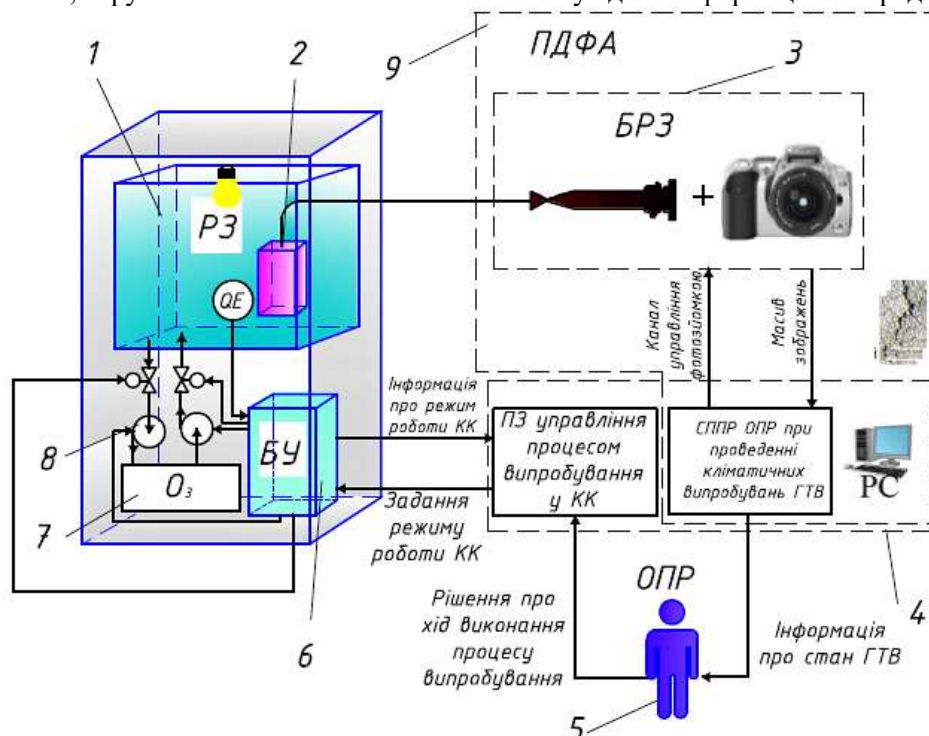


Рисунок 6 – Структурно-функціональна схема автоматизованої системи управління кліматичними випробуваннями ГТВ на прикладі озонової випробувальної камери: 1 – робоча зона (РЗ) КК із джерелом освітлення; 2 – зразок ГТВ; 3 – блок реєстрації зображень (БРЗ), що представляє собою цифрову фотокамеру, зв'язану з промисловим фіброскопом; 4 – робоча станція; 5 – особа, яка приймає рішення про хід проведення випробування (ОПР); 6 – блок управління (БУ) КК; 7 – озонова установка; 8 – контур регулювання концентрації озону у робочій зоні КК; 9 – підсистема динамічного фотоаналізу (ПДФА) ступеня старіння ГТВ

Робоча станція взаємодіє з блоком управління кліматичною камерою через промислові інтерфейси (зокрема RS-485), що забезпечує як керування режимами випробувань (температура, вологість, концентрація озону), так і збір даних із датчиків. Отримана інформація використовується для аналізу впливу параметрів середовища на процеси старіння.

Автоматизація процесу фотозйомки реалізується за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке підбирається відповідно до типу використовуваної камери. Для промислових камер відповідне ПЗ зазвичай входить до комплексу постачання, тоді як для комерційних фотокамер можуть застосовуватися сторонні рішення.

Інтеграція підсистеми фотоаналізу у контур управління дозволяє реалізувати принцип зворотного зв'язку, за якого результати обробки зображень безпосередньо впливають на параметри випробувань. Це відкриває можливості для адаптивного керування процесом старіння, зокрема для його інтенсифікації або моделювання реальних умов експлуатації.

Висновки. У роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу підвищення ефективності та об'єктивності кліматичних випробувань гумотехнічних виробів шляхом інтеграції методів машинного зору в автоматизовану систему управління випробуваннями.

Проведений аналіз існуючих підходів до кліматичних випробувань ГТВ показав, що основним їх недоліком є дискретність і суб'єктивність контролю стану зразків, що обмежує точність оцінювання процесів старіння та ускладнює дослідження їх динаміки. Встановлено, що сучасні методи обробки зображень мають значний потенціал для вирішення задач неруйнівного контролю, однак їх застосування у випробуваннях ГТВ потребує адаптації до специфіки процесів деградації гумових матеріалів.

У роботі удосконалено підхід до організації кліматичних випробувань шляхом представлення їх у вигляді комплексної інформаційно-вимірювальної системи, що включає взаємодію лабораторії, нормативної бази, бази знань та підсистеми прийняття рішень. Запропоновано структурно-функціональні схеми процесу випробувань і модифікованої автоматизованої системи управління з інтегрованою підсистемою динамічного фотоаналізу.

Розроблено концепцію підсистеми динамічного фотоаналізу, яка забезпечує безперервний моніторинг стану поверхні зразків у процесі старіння, автоматизоване виділення інформативних ознак (тріщини, їх геометричні параметри, площа пошкоджень) та формування кількісних показників деградації. Показано, що використання візуальних критеріїв дозволяє підвищити точність визначення коефіцієнта кліматичного старіння та, у ряді випадків, скоротити обсяг механічних випробувань.

Експериментальні дослідження підтвердили можливість отримання репрезентативних даних про процеси старіння ГТВ на основі аналізу цифрових зображень, а також доцільність використання калібрувальних процедур для переходу до метричних оцінок параметрів дефектів. Ключовим результатом роботи є обґрунтування ефективності інтеграції підсистеми машинного зору в контур управління кліматичною камерою, що забезпечує реалізацію зворотного зв'язку та створює передумови для адаптивного керування режимами випробувань. Це дозволяє підвищити інформативність експериментів, зменшити вплив людського фактору та забезпечити відтворюваність результатів.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці спеціалізованих алгоритмів сегментації та класифікації дефектів із використанням методів глибокого навчання, створенні баз даних зображень процесів старіння ГТВ, а також у впровадженні інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень для автоматизованої оптимізації режимів кліматичних випробувань.

Інформаційні джерела

1. Кліматичні камери. URL: <https://alsi.ua/product-category/obladnannia/modeliuvannia-umov/klimatychni-kamery/> (дата звернення: 20.03.2026).
2. Вовк С. М., Гнатушенко В. В., Бондаренко М. В. Методи обробки зображень та комп'ютерний зір: навч. посіб. Д.: «ЛІРА», 2016. 148 с.
3. Жученко А. І., Черепанська І. Ю., Сазонов А. Ю., Ковалюк Д. О. Технології штучного інтелекту та основи машинного зору в автоматизації: теорія і практика. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2019. 386 с.
4. Доманцевич Н. І., Яцишин Б. П. Теоретичні аспекти процесів старіння полімерних матеріалів. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету*. Львів: ЛТЕУ, 2022. Вип. 30. С. 5-13. DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-30-01>

5. Спорягін Е. О., Варлан Е. О. Теоретичні основи та технологія виробництва полімерних композиційних матеріалів: навч. посібник. Дніпропетровськ: Вид-во ДНУ, 2012. 190 с.
6. Stadler R., Maurer A. Methods for durability testing and lifetime estimation of thermal interface materials in batteries. *Batteries*. 2019. 5 (34). P. 1-11.
7. Денисюк В. Ю. Автоматизація виробничих процесів в приладобудуванні: електронний посіб. URL: <https://surl.li/dydera> (дата звернення: 20.03.2026).
8. Доманцевич Н. І., Яцишин Б. П. Старіння полімерних матеріалів: фактори впливу, методи дослідження, моделювання та прогнозування процесів: монографія. Львів: ЛТЕУ, 2023. 184 с.
9. ДСТУ ISO 188:2019. Гума вулканізована або термопластична. Випробування на прискорене старіння та теплостійкість. [Чинний від 2019-01-09]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 12 с.
10. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Шибковський І. А. Метрологічне забезпечення вимірювання механічних та трибологічних властивостей матеріалів на субмікронному і нанометровому діапазонах лінійних розмірів. Збірник статей «Перспективні технології та прилади». 2020. Вип. 17. С. 33-41. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-17-5>
11. ДСТУ ISO 2230:2018. Вироби із гуми. Настанови щодо зберігання (ISO 2230:2002, IDT). [Чинний від 2018-01-06]. Київ, 2018. 14 с. (Інформація документація).
12. Холяк В. В., Владимірський І. А., Жабинська О. О. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів: навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2016. 156 с.

UDC 004.93:620.17:678.06

Denysiuk V.

Lutsk National Technical University

AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR CLIMATE TESTING OF RUBBER PRODUCTS USING MACHINE VISION METHODS

The paper considers the problem of increasing the efficiency of climatic tests of rubber products exposed to aggressive environmental factors, in particular temperature, humidity, ozone and ultraviolet radiation. It is established that the existing methods of monitoring the condition of samples in climatic chambers are characterized by discreteness, subjectivity and insufficient accuracy, which complicates the study of the dynamics of aging processes. Modern approaches to conducting climatic tests and machine vision methods for detecting surface defects of materials are analyzed. The feasibility of integrating computer vision methods into automated test management systems is substantiated. The structure of an automated control system for climatic tests of rubber products is proposed, which includes a subsystem for dynamic photoanalysis of the condition of samples. Approaches to collecting, processing and analyzing graphic information are developed, which allow for a quantitative assessment of the degree and nature of aging based on the parameters of crack formation and changes in the surface of the material. The implementation of the proposed approach provides continuous monitoring of the aging process, reducing the influence of the human factor and increasing the objectivity of test results. The results obtained can be used to optimize climatic testing regimes and improve rubber material formulations.

Keywords: *rubber products, climatic testing, polymer aging, machine vision, image processing, automated control system, crack formation.*

Дата першого надходження
статті до видання
08.04.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
29.04.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.

УДК 531.1; 62-2

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-5

Защепкіна Н. М., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9397-6632>

Тимчик Р. Г.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

НАЛАШТУВАННЯ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТА НА ВЕРСТАТІ З ЧПК

Розмірний знос різального інструмента – це складне, комплексне явище. Існує кілька різних механізмів зносу, які діють самостійно або у поєднанні один з одним. Виділяють чотири основні види зносу: абразивний, адгезійний, дифузійний та втомний. Однак досі жодному з дослідників не вдалося точно, виключно лише теоретичним шляхом передбачити інтенсивність зносу різального інструмента та його вплив на геометричні розміри оброблюваних деталей.

Тому для визначення часових характеристик достовірної інтенсивності зношування інструмента в конкретних умовах даної технологічної системи необхідно звертатися до експериментальних досліджень. Серед режимів обробки швидкість різання чинить найбільший вплив на період стійкості різального інструмента, а отже – і на швидкість його зношування.

Наведено результати експериментальних досліджень за апробованою методикою визначення розмірного зносу різального інструмента та його впливу на точність обробки партії деталей. Отримані результати можуть бути використані при дослідженнях з іншими інструментами при обробці інших марок матеріалів і режимів обробки.

Ключові слова: розмірний знос, підналаштування, інформаційно-вимірвальна система, геометричні розміри, точність, похибка, вимірювання.

Постановка проблеми. Автоматизація виготовлення прецизійних деталей в сучасному прецизійному приладобудуванні процесами механічного різання неможлива без наявності і використання аналітичних залежностей, які описують механіку цього процесу з динамічними змінами. Достовірна інформація про такі залежності є основною комплексної автоматизації виробництва. Автоматизація процесу виготовлення деталей механічною обробкою металів враховує вплив режимів обробки на зносостійкість інструмента, точність і тривалість обробки.

Відсутність універсальних аналітичних моделей про однозначний зв'язок між незалежними параметрами процесу різання (швидкістю, подачею, тощо) з одного боку, та залежними параметрами (розмірна зносостійкість інструмента, показники якості поверхні деталі, енергозатрати, тощо) з іншого боку.

Найскладнішим питанням, за інших рівних умов, виступає точність розмірів і якість поверхні виготовлення деталей, які залежать від багатьох похибок токарної обробки.

Аналіз останніх досліджень. Вивченню точності обробки на токарних верстатах присвячено багато робіт, і особливо на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), де автоматичне регулювання процесу обробки за фактичними значеннями його параметрів забезпечує краще використання можливостей верстата та інструменту, спрощує керуючі програми, знижує витрати на програмування та саму обробку загалом [1, 2, 3].

Дослідження похибок обробки дозволяє обґрунтовано призначити параметр управління та вибрати структуру САК. Таким чином, вивчення складових сумарної похибки чистової обробки на токарних верстатах з ЧПК є актуальним.

Сучасні Автоматичні системи граничного регулювання забезпечують підвищення продуктивності обладнання за рахунок максимального використання силових можливостей верстата при непрямому підтриманні точності в межах допуску. Але для виготовлення прецизійних деталей приладів мають обмежене використання [4, 5, 6].

Однак, хоча підвищені режими й скорочують машинний час, вони не завжди оптимальні з точки зору продуктивності та собівартості через зниження терміну служби інструменту, що, в свою чергу, призводить до необхідності його частішої заміни [7, 8, 9]. Розроблено ряд систем граничного управління, що забезпечують стабілізацію стійкісних характеристик процесу різання, рівня вібрацій та інших параметрів обробки. Наприклад, швидкість зносу інструменту стабілізують регулюванням швидкості різання за незмінної величини подачі на оберт заготовки. Недоліком розглянутих систем управління є недостатнє використання можливостей

технологічної системи. Тому були розроблені автоматичні системи оптимального управління. Такі системи поділяються на пошукові та безпошукові (за регулярним алгоритмом).

Метою статті є дослідження систематичних і випадкових похибок, що виникають під час обробки деталей на верстатах із ЧПК, та створення аналітичних моделей для визначення їхнього впливу на точність обробки. У роботі ставиться завдання експериментально оцінити складові сумарної похибки, зокрема розмірний знос ріжучого інструмента, його теплові деформації розмірів та похибку позиціонування супорта верстата.

Аналіз складових сумарної похибки обробки на токарних верстатах з ЧПК. Похибки виготовлення деталей на верстаті поділяють на систематичні та випадкові. Мінімізують ці похибки шляхом поточного налаштування положення ріжучого інструмента на верстаті.

Похибки обробки, такі як розмірний знос інструмента та його теплові деформації розмірів, тощо, призводять до зміщення початкового положення вершини інструмента, яке задається програмою обробки деталі. Компенсацію цього зміщення здійснюють розмірним підналаштуванням ріжучого інструмента, тобто додатковим переміщенням супорта верстата, що супроводжується додатковою похибкою розмірної корекції.

Основні складові сумарної похибки обробки під час роботи на верстатах із ЧПК: похибка позиціонування супорта, розмірний знос інструмента, похибка розмірної корекції, теплові похибки, тощо [10, 11].

Для практичного підтвердження теоретичних положень проведено експериментальні дослідження точності виготовлення партії ступінчастих валиків в умовах чистового точіння на верстаті ТПК-125 ВМ із системою ЧПК типу «Електроніка К.60.680-CNC». Для визначення похибки позиціонування супорта вимірювали положення супорта у базовій точці за допомогою індикатора типу ІЦЦ 25,4/0,001 мм, який був жорстко з'єднаний за допомогою кронштейна з салазками супорта (рис. 1).



Рисунок 1 – Індикатор ІЦЦ 25,4/0,001 мм

Постановка експериментальних досліджень. Індикатор упирався вимірювальним наконечником у упор, встановлений на супорті верстата. Ціна поділки шкали індикатора 0,001 мм, діапазон вимірювань складав 1 мм. Після обробки чергової деталі супорт повертався у нульове положення. Готова деталь знімалася з верстата й передавалася на вимірювальну позицію.

Встановлювалася нова заготовка, і цикл повторювався. Після обробки партії з 10 деталей задавали різні значення корекції положення вершини інструмента. Вимірювання діаметрів деталей у перерізах А–А та В–В здійснювали за допомогою мікрометра з ціною поділки 0,001 мм (див. рис. 2).

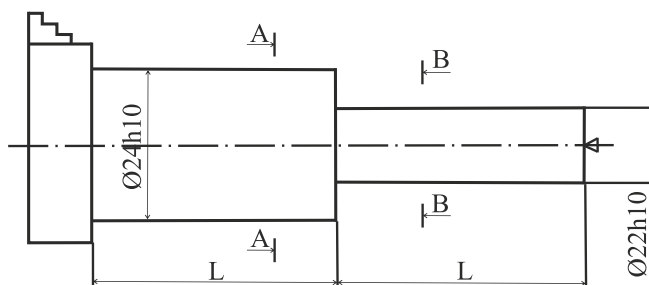


Рисунок 2 – Схема вимірювань діаметра деталі

За показами мікрометра побудовано точкові діаграми вимірювання розмірів X_{nk} і X'_{nk} у партії деталей (див. рис. 3), а за показами індикатора – діаграми положення супорта верстата у нульовій точці.

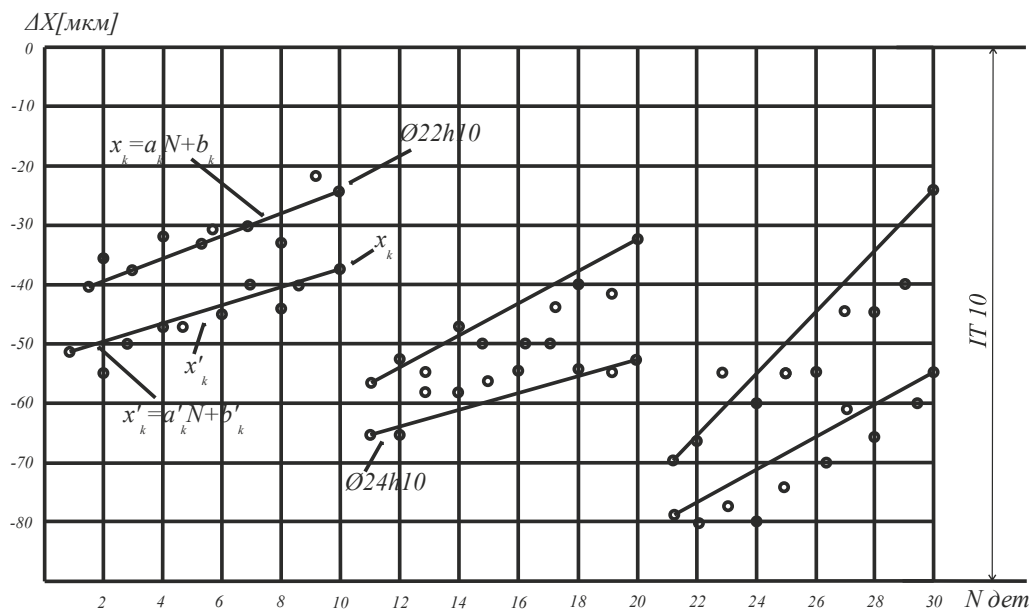


Рисунок 3 – Діаграма розмірів партії деталей

Множина вимірних розмірів у партії 10 шт. деталей, а також різниця положень Z_{nk} супорта між заданим за програмою значенням переміщення з урахуванням корекції та фактичним – за показами індикатора, розглядалися як випадкові величини, де n – номер деталі, а k – номер корекції.

Випадкову складову сумарної похибки обробки за результатами вимірювань значень X_{nk} і X'_{nk} для кожної реалізації розраховували як вибіркові дисперсії σ_{nk} і σ'_{nk} розсіювання розмірів деталей відносно їхніх середніх значень.

Оцінка точності позиціонування інструмента. Статистичні показники точності позиціонування визначали по діаграмі положення супорта. На графіку точності позиціонування (рис. 4) показано накопичені відхилення A . Їх визначали як алгебраїчну різницю екстремальних середньоарифметичних значень відхилень фактичних положень супорта від запрограмованих, та середньоквадратичні відхилення σ_a розсіювання відхилень під час десятикратного підходу до запрограмованого положення в межах кожної реалізації.

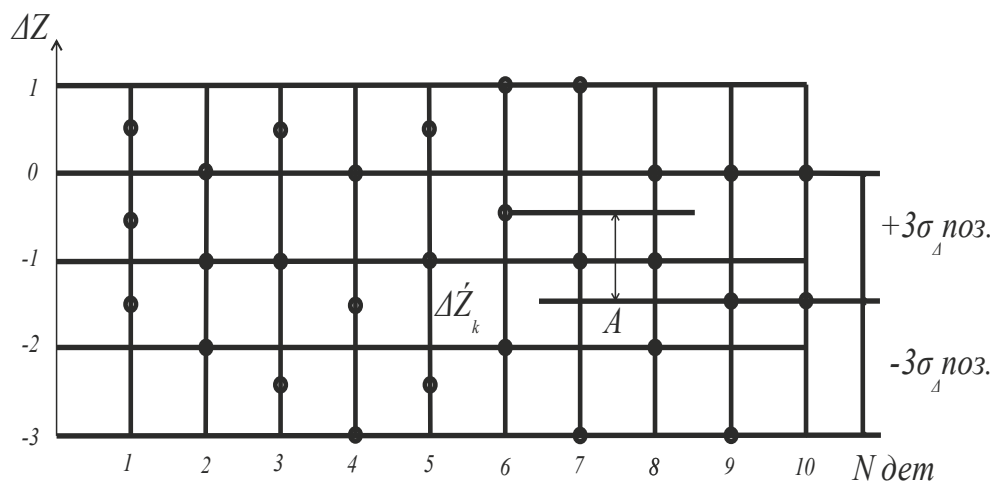


Рисунок 4 – Графік відхилень позиціонування супорта

Окрім накопиченого відхилення A (систематична похибка позиціонування) визначали й інші систематичні складові загальної похибки обробки в межах окремих реалізацій, які апроксимовано лінійною залежністю.

Для кожної реалізації отримано рівняння лінійної регресії:

$$X_k = a_k N + b_k \quad \text{і} \quad X'_k = a'_k N + b'_k. \quad (1)$$

Нахил прямих визначається впливом ряду похибок, основними з яких є: систематична складова похибки позиціонування A_k , розмірний знос інструмента та його теплові деформації.

Для встановлення зв'язку між сукупністю випадкових величин $\varphi = 1/2(X - X')$ та Z , обчислено коефіцієнт кореляції та кореляційне відношення. Характер залежності випадкових величин визначався за точковою діаграмою розсіювання. Між спостережуваними випадковими величинами існує тісний зв'язок, а їх зміна наближена до лінійної залежності.

Про зміни спостережуваних випадкових величин у процесі виготовлення партії деталей, а також кількісні характеристики цієї зміни оцінювали за коефіцієнтом кореляції та рівнянням лінійної регресії.

Отриманий коефіцієнт кореляції $Z = 0,92$ та рівняння лінійної регресії:

$$\varphi = 0,92X + 5,0 \quad (2)$$

підтверджують початкові припущення та свідчать про наявність лінійного зв'язку між точністю відпрацювання корекції та зміною розмірів у партії деталей.

За результатами експериментальних досліджень сформульовано такі висновки:

- між точністю корекції та зміною розмірів у партії деталей встановлено тісний зв'язок із коефіцієнтом кореляції $Z = 0,92$.

- розсіювання розмірів партії деталей однієї реалізації розмірної корекції відбувається через розмірний знос інструмента та температурні деформації, нестабільність позиціонування супорта;

- основним резервом підвищення точності обробки деталей є зменшення похибок, спричинених розмірним зносом інструмента, його тепловими деформаціями та похибками позиціонування супорта верстатом.

Отже, для забезпечення високої точності обробки деталей необхідно здійснювати систематичне підналаштування положення вершини ріжучого інструмента після обробки кожної деталі. Це дозволить контролювати ресурс зносостійкості інструмента, що дає змогу достовірно враховувати його ріжучі можливості під час розв'язання різних завдань автоматичного керування процесом різання – на основі створення безконтактної автоматичної системи підналаштування ріжучого інструмента на верстаті.

Для підвищення точності металообробки вершина ріжучого інструмента під час обробки чергової деталі повинна переміщатися по опорній траєкторії. Насправді цього не відбувається через зміщення вершини інструмента внаслідок різних умов обробки та похибок системи і верстата.

Випадкові похибки визначаються типом обраного технологічного обладнання й складні для зменшення через їх стохастичний характер. Систематичні похибки, що в кілька разів перевищують випадкові, необхідно компенсувати.

Основними причинами систематичних похибок є розмірний знос інструмента, температурні та інші деформації системи. З метою визначення цих величин на верстатах установлюють різного типу датчики – вимірювальні перетворювачі, на основі яких створюють автоматичні системи керування [12,13,14].

Алгоритм підналаштування інструмента. Запропонована система в загальному випадку містить: токарний верстат – як засіб керування; процес металообробки – як об'єкт керування; джерело інформації про процес – вимірювальний перетворювач; систему ЧПК із мікропроцесором та відповідні алгоритми цієї системи.

Загальний алгоритм роботи системи підналаштування ріжучого інструмента наведено на рисунку 5.



Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма підналаштування інструмента

Система працює таким чином:

КРОК 1: введення вихідних даних процесу різання, керуючих програм і попередні розрахунки.

КРОК 2: позиціонування інструмента.

КРОК 3: калібрування вимірювального перетворювача та всієї системи в цілому.

КРОК 4: виконання керуючої програми – процес металообробки.

КРОК 5: контроль інструмента.

КРОК 6: розрахунок коригувальних значень траєкторії.

КРОК 7: перевірка обмежень; якщо вони не виконуються – зупинка.

КРОК 8: корекція й перехід до обробки наступної деталі.

Для підналаштування інструмента після обробки чергової деталі, необхідно перемістити супорт верстата таким чином, щоб вершина інструмента знову зайняла початкову точку, в системі координат верстата.

Для визначення величини підналаштування супорта запропоновано розробити безконтактний оптичний прилад, який має нерухому опорну напівплощину, розміщену на верстаті у вимірювальній позиції. Вона буде базовою для визначення положення вершини ріжучого інструмента (Рис. 6). Тому пропонується на станині верстата нерухомо встановити опорну напівплощину на рівні осі обертання деталі та винести її за межі зони заміни деталі – у поле переміщень вершини інструмента. Вершина інструмента 1 підводиться до опорної напівплощини 2 на відстань a_0 , при цьому координати супорта верстата запам'ятовуються й приймаються за вихідну точку для програми обробки деталі. Ці координати супорта є початковими базовими для даного різального інструмента. Після обробки чергової деталі супорт повертається у вихідну точку, при цьому вершина різальної кромки інструмента утворює щілину розміром a_1 з опорною базовою напівплощиною.

Різниця між початковою шириною щілини a_0 і поточною a_1 є зміщенням вершини інструмента в системі координат верстата внаслідок розмірного зносу інструмента і температурних деформацій $h = a_0 - a_1$

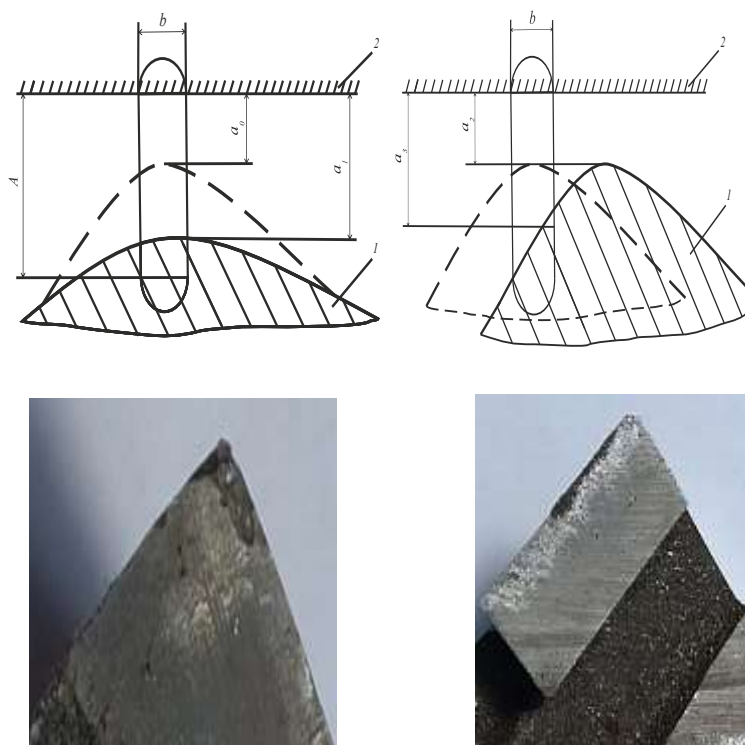


Рисунок 6 – До визначення положення вершини різального інструмента

На щілині, утвореній опорною вершиною 1 інструмента та напівплощиною 2, відбувається дифракція когерентного лазерного випромінювання. Дифракційна картина реєструється лінійкою приладів із зарядовим зв'язком (CCD). Вихідний відеосигнал через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і інтерфейс надходить у пристрій пам'яті мікропроцесора системи ЧПК верстата, де за відповідними алгоритмами обробляється й обчислюється величина ширини щілини a_0 , яка запам'ятовується.

Далі виконують обробку деталі і повертають супорт у вихідну базову точку системи координат верстата. Система аналізу обробляє дифракційне зображення щілини, обчислює нове значення її ширини a_1 , визначає різницю $a_1 - a_0$ і виконує корекцію положення супорта верстата з метою компенсації зміщення вершини інструмента.

Перед початком металообробки положення вершини інструмента зазвичай точно не визначене, але завжди може бути встановлене з точністю до ± 5 мм. У цьому випадку система повинна визначити положення вершини інструмента до початку обробки, тобто здійснити початкове позиціонування інструмента. Для цього різальний інструмент 1 супортом верстата переміщують «вперед» спостерігаючи візуально до опорної напівплощини 2, доки одна з бічних граней не потрапить у поле лазерного випромінювання, як показано на рис. 6.

Потім виконують поперечне переміщення інструмента 1. Мінімальне значення ширини щілини відповідає центральному положенню вершини інструмента по лінії вимірювань. При цьому точність позиціонування за допоміжною координатою дорівнює половині ширини освітлювального пучка $\Delta Z = b/2$. Таким чином може бути виконане позиціонування різального інструмента 1, оскільки ширина щілини вимірюється та задається заздалегідь, а положення опорної напівплощини 2 на верстаті відоме з попередніх вимірювань.

Розглянутий варіант підналаштування прохідних різців може бути поширений і на інші типи різального інструмента за відповідного розташування опорної напівплощини.

Висновки. Похибки обробки на верстатах із ЧПК зумовлені зносом інструмента, тепловими деформаціями та неточністю позиціонування, і для їх мінімізації потрібне автоматичне підналаштування інструмента, особливо в умовах гнучких виробничих систем. Експериментальні дослідження підтвердили, що розсіювання розмірів деталей викликане нестабільністю руху супорта, поступовим зносом різця та температурними впливами, але точність корекції дозволяє отримувати 9-й квалітет точності.

Встановлено тісний лінійний зв'язок ($r = 0,92$) між точністю відпрацювання корекції та розмірами виготовлених деталей, що підтверджує критичну роль своєчасної компенсації зміщення вершини інструмента.

Головні резерви підвищення точності – зменшення систематичних похибок: розмірного зносу інструмента, термічних деформацій та помилок позиціонування ЧПК. Для забезпечення стабільної точності запропоновано використовувати безконтактний оптичний дифракційний метод підналаштування: лазерне освітлення щілини між інструментом і опорною напівплощиною дозволяє точно визначати зміщення вершини різця та формувати корекцію.

Такий підхід дає змогу позиціонувати інструмент, контролювати його знос і стабілізувати геометричні параметри деталей, що робить його перспективною основою для автоматизованих систем керування процесом обробки деталей різанням.

Інформаційні джерела

1. Попов С.В. Дослідження точності оброблення циліндра різцем із твердого сплаву. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2025. Вип. 15, том 1. С.105-113. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-12>.
2. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія/ Фролов Є.А., Кравченко С.І., Попов С.В., Гнітько С.М. Полтава: НУПП, 2019. 204 с.
3. Оптимізація режимів різання на важких верстатах/ Г.П.Клименко та ін. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. 2022. No2(6). С. 43-48. DOI: [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2\(6\).06](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2(6).06).
4. Influence of tool wear and workpiece diameter on surface quality and prediction of surface roughness in turning/ C. Li et al. Metals. 2024. Vol. 14, No. 11. Article 1205. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14111205>.
5. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей: монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.
6. An experimental study on the effect of tool geometry on tool wear and surface roughness in hard turning /Pham M.D., Le H.G., Mai D.D., Do T.S. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2020. Vol.12(9).Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814020959885>.
7. Dimla E. Correlation of cutting force features with tool wear in a metal turning operation.Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2001. Vol. 215, no. 3. Pp.435-440. DOI: <https://doi.org/10.1243/0954405011515370>.
8. Hu C., Xiong W., Sun W., & Shuai Y. (2019). Research on the mechanism of improving hydrostatic spindle rotating accuracy with controllable restrictor. Journal of Mechanical Engineering, 55(11), 160-168.
9. Кучугуров М.В. Влияние износа режущего инструмента на особенности динамики процесса резания при токарной обработке. Різання і інструмент в технологічних системах. 2015. Вип. 85. С.163-170.
10. Шевченко О. В. Підвищення точності обробки на токарних автоматизованих верстатах шляхом мікрорегулювання положення різця /О. В. Шевченко, Т. Г. Гримуд. Вісник НТУУ "КПІ". Машинобудування. 2010. № 59. С. 59-64. https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000303381&local_base=KPI01.
11. Алтухов, В. М., Руднев, Є. С. Дослідження теплових явищ при різанні важкооброблюваних матеріалів в умовах точіння / В. М. Алтухов, Є. С. Руднев. 2022. – 8 с. <https://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/08/2022-23-10.pdf>.
12. Забезпечення надійності різального інструмента : навчальний посібник / Ю. О. Харламов, В. І. Соколов, О. С. Кроль та ін. – Северодонецьк : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2019. – 212 с. <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/185>.
13. Gu, Guquan, et al. A review of the research on the variation of tool's motion trajectory and its influence on the formation mechanism of surface quality in ultrasonic vibration machining. /Journal of Manufacturing Processes 107 2023: pp. 294-319. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612523009702>.
14. Zhang, Zhiyu, Jiawang Yan, and Tsunemoto Kuriyagawa. Manufacturing technologies toward extreme precision. /International Journal of Extreme Manufacturing 1.2 2019: p. 23 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-7990/ab1ff1/meta>.

UDC 531.1; 62-2

Zashchepkina N., Tymchyk R.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

CUTTING TOOL SETTING ON CNC MACHINE

Dimensional wear of a cutting tool is a complex, complex phenomenon. There are several different wear mechanisms that act independently or in combination with each other. Four main types of wear are distinguished: abrasive, adhesive, diffusion and fatigue. However, so far none of the researchers has been able to accurately, exclusively theoretically, predict the intensity of wear of a cutting tool and its influence on the geometric dimensions of the machined parts.

Therefore, to determine the time characteristics of the reliable intensity of tool wear in the specific conditions of this technological system, it is necessary to resort to experimental studies. Among the processing modes, the cutting speed has the greatest impact on the stability period of the cutting tool, and therefore on its wear rate. The results of experimental studies using the approved method of determining the dimensional wear of the cutting tool and its influence on the accuracy of processing a batch of parts are presented.

The results obtained can be used in studies with other tools when processing other grades of materials and processing modes.

Keywords: *dimensional wear, adjustment, information and measuring system, geometric dimensions, accuracy, error, measurement.*

Дата першого надходження
статті до видання
11.02.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
06.03.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.

УДК 620.179.14

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-6

Литвинов О. О., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-9540-0327>

Хмельницький національний університет

ОБРОБКА ТА АНАЛІЗ ВІБРОСИГНАЛІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ШАРОВИХ ОПОР АВТОМОБІЛЯ

Безпека автомобіля залежить від стану підвіски. Шарова опора є критичним вузлом, дефекти якого (знос, люфт, корозія) важко виявити традиційними методами. Стендові випробування потребують дорогого обладнання, а ручна перевірка є суб'єктивною. Вібросигнали від підвіски мають складну структуру, поєднуючи низькочастотні коливання кузова, дорожній шум та високочастотні удари від люфтів. Сигнал від дефектної опори є нестационарним та імпульсним. Класичні методи (FFT) неефективні, оскільки розмазують удари по спектру без чітких діагностичних ознак та втрачають часову інформацію.

Статтю присвячено комбінованій методиці вібродіагностики, що поєднує: статистичний аналіз у часовій області (ексцес, пік-фактор), спектральний аналіз та часо-частотні методи на основі вейвлет-перетворення. Статистичні показники забезпечують автоматизоване виявлення ударів з простими числовими критеріями. Вейвлет-аналіз дає часо-частотну локалізацію, дозволяючи відокремити удари від фону. Моделювання показало, що комбіноване застосування ексцесу, пік-фактора та вейвлетів виявляє люфти з високою чутливістю навіть на фоні значного зовнішнього шуму. Пропонується дворівневий алгоритм: реальночасова детекція статистичними методами та експертний аналіз вейвлет-спектрограм для підтвердження. Це робить метод практично застосовним для портативних систем діагностики.

Ключові слова: вібродіагностика, шарова опора, ексцес, пік-фактор, вейвлет-перетворення, обробка сигналів.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Звичайні методи перевірки шарових опор – візуальний огляд, механічне "розхитування" елементів підвіски, використання люфт-детекторів – мають низку недоліків: значну залежність від кваліфікації виконавця, неможливість об'єктивно оцінити ранні стадії зносу, потребу у виведенні автомобіля з експлуатації та використанні спеціальних стендів. На цьому фоні вібродіагностика розглядається як перспективний підхід, який дозволяє оцінювати стан вузла за динамічною відповіддю системи на робочі навантаження або спеціальні тестові впливи.

Шарова опора, будучи кінематичним шарніром із кульовим пальцем, у справному стані забезпечує плавний рух без ударів. При появі зазору виникають ударні процеси, які генерують короткочасні імпульси прискорення. Ці імпульси накладаються на фонові коливання від нерівностей дороги та роботи інших елементів підвіски. Таким чином, завдання діагностики зводиться до виділення та аналізу нестационарних, імпульсних компонент вібросигналу на фоні широкосмугового шуму.

Виклад основного матеріалу. Для теоретичного аналізу розглядається вібросигнал у вигляді суми стохастичного компонента та імпульсних подій:

$$x(t) = x_{noise}(t) + \sum_k a_k \delta(t - t_k), \quad (1)$$

де $x_{noise}(t)$ – стохастичний дорожній шум,

a_k – амплітуда k -го удару,

t_k – момент часу виникнення удару.

У дискретному вигляді:

$$x[n] = x_{noise}[n] + \sum_k a_k \cdot u[n - n_k]. \quad (2)$$

Перед обробкою сигнал центрується:

$$y_i = x_i - \bar{x}, \text{ де } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (3)$$

Центрований сигнал y_i використовується у всіх наступних розрахунках.

• Середньоквадратичне значення (RMS) - характеризує енергетичний рівень вібрацій і пов'язаний з активною потужністю вібраційного процесу [1]. Це найстійкіший до окремих викидів параметр.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2}. \quad (4)$$

де N – кількість відліків сигналу у часовому вікні;

y_i – центрований сигнал у точці i ;

$\sum_{i=1}^N y_i^2$ – сума квадратів усіх значень.

Переваги цього методу:

- простий розрахунок й інтерпретація;
- стійкий до одиничних викидів (на відміну від пікового значення);
- добре корелює з загальним сприйманим рівнем вібрацій.

Недоліки цього методу:

- малоінформативний для діагностики імпульсних дефектів (люфтів). Справна і дефектна опора можуть мати однакові RMS.
- не вказує на природу дефекту, лише на інтенсивність.
- втрачає часову прив'язку інформації.

Для шарової опори RMS підходить як експрес-тест загального стану, але недостатній як єдиний діагностичний критерій. Використовується переважно як допоміжний параметр у нормуванні інших показників

• Екссес (Kurtosis) - оцінює ступінь "гостровершності" розподілу амплітуд [2]. Для гаусового шуму $K \approx 3$. Удари піднімають це значення до 8–10, тому це найкращий критерій для автоматичної детекції люфту. Рекомендований поріг: $K > 4.5$ означає ймовірний люфт.

$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2\right)^2}. \quad (5)$$

де N – загальна кількість відліків сигналу у часовому вікні;

y_i – центрований сигнал у точці i ;

$\sum_{i=1}^N y_i^4$ – сума 4-х степенів всіх значень (чисельник);

$\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2\right)^2$ – квадрат RMS (знаменник).

Переваги цього методу:

- феноменальна чутливість до ударів завдяки 4-му степеню.
- простий розрахунок в реальному часі у ковзному вікні.

Недоліки цього методу:

- чутливість до зовнішніх завад та електричного шуму датчика.
- залежність результату від розміру часового вікна.
- нелінійний зв'язок з кількістю/амплітудою ударів.

• Пік-фактор (Crest Factor) показує, в скільки разів найсильніший удар перевищує «середній» рівень вібрації. Це лінійна (не піднесена в степінь) характеристика, більш стійка до артефактів, ніж екссес [3,4]. Рекомендований поріг: $CF > 5.0$ служить як підтверджуючий критерій до екссесу.

$$CF = \frac{\max|y_i|}{X_{RMS}}, \quad (6)$$

$$\text{де } X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2}.$$

$\max|y_i|$ – максимальна абсолютна амплітуда сигналу у вікні;

X_{RMS} – середньоквадратичне значення центрального сигналу;

N – кількість відліків.

Переваги цього методу:

- висока інтерпретованість: $CF = 8$ означає удар в 8 разів вище за RMS.
- стабільність та стійкість до одиничних електричних сплесків.
- пряма відповідність механічному навантаженню на вузол.

Недоліки цього методу:

- менш чутлива до частих слабких ударів порівняно з екссесом.
- потребує попереднього розрахунку RMS.

• Спектральний аналіз (FFT) - розкладає сигнал на набір синусоїдальних компонент, виявляючи частотний склад та резонанси конструкції підвіски. FFT є допоміжним методом, недостатнім як єдиний критерій для діагностики люфту [5].

Формула дискретного перетворення Фур'є:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} y[n] e^{-j2\pi kn/N}, \quad (7)$$

де $j = \sqrt{-1}$, $k = 0, 1, \dots, N - 1$.

$y[n]$ – n -й відлік центрованого сигналу;

k – номер частотної лінії спектра;

$e^{-j2\pi kn/N}$ – комплексна експонента для розкладу на гармоніки.

Переваги цього методу:

- виявлення резонансів, які збуджуються ударами.
- розділення фонових компонент (шум від двигуна).

Недоліки цього методу:

- удари виглядають як неспецифічне підвищення "шумової полиці" без чітких піків.
- втрата часової інформації про момент удару.

Часо-частотний аналіз (CWT) - дозволяє одночасно локалізувати подію в часі та частоті. Результат – тривимірний об'єкт (час, частота, енергія), що візуалізується як теплова карта (спектрограма) [6,7].

Формула безперервного вейвлет-перетворення:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (8)$$

де: a – масштабний параметр ($a > 0$); менші значення відповідають вищим частотам;

b – часовий зсув (локалізація у часі);

$\psi(t)$ – материнський вейвлет (базова функція);

$\psi^*(t)$ – комплексне спряження вейвлета;

$1/\sqrt{a}$ – коефіцієнт нормалізації енергії.

Переваги цього методу:

- часо-частотна локалізація: показує коли та на якій частоті виникає удар.
- виділення нестационарних подій, включених у фоновий шум.
- діагностична специфічність: різні типи ударів дають різні вигляди спектрограм.

Недоліки цього методу:

- висока обчислювальна вартість (неможливо в реальному часі на мікроконтролері).
- складність інтерпретації результатів без навчання.
- залежність від вибору вейвлета та параметрів.

Виконавши аналіз всіх методик був запропонований дворівневий алгоритм діагностики:

1. Рівень 1 (Real-time): Розрахунок ексцесу K та пік-фактора CF у ковзному вікні. При перевищенні порогів ($K > 5$ або $CF > 5$) система видає сигнал про дефект.

2. Рівень 2 (Post-processing): При спрацюванні рівня 1 записується фрагмент "сирого" сигналу та проводиться CWT-аналіз для візуального підтвердження діагнозу і виключення хибних спрацювань.

Такий підхід поєднує швидкість і простоту (рівень 1) з достовірністю та специфічністю (рівень 2), що робить його практично застосовним для побудови портативних систем діагностики шарових опор автомобіля.

Моделювання сигналів справної та дефектної шарової опори. Для верифікації методики було проведено цифрове моделювання двох сценаріїв. Сигнали були синтезовані з частотою дискретизації 1000 Гц, тривалість запису – 1 секунда (1000 відліків).

Справна опора: Сигнал складається з гаусівського білого шуму з амплітудою близько 0.05–0.1 g, що імітує вібрацію від нерівностей дороги та коливання кузова на підвісці без люфтів.

Дефектна опора: Той же фоновий шум, доповнений імпульсами амплітудою близько 0.7–0.9 g у моменти часу $t = 0.25$ с та $t = 0.73$ с. Ці імпульси моделюють вибирання люфту під час наїзду на перешкоду.

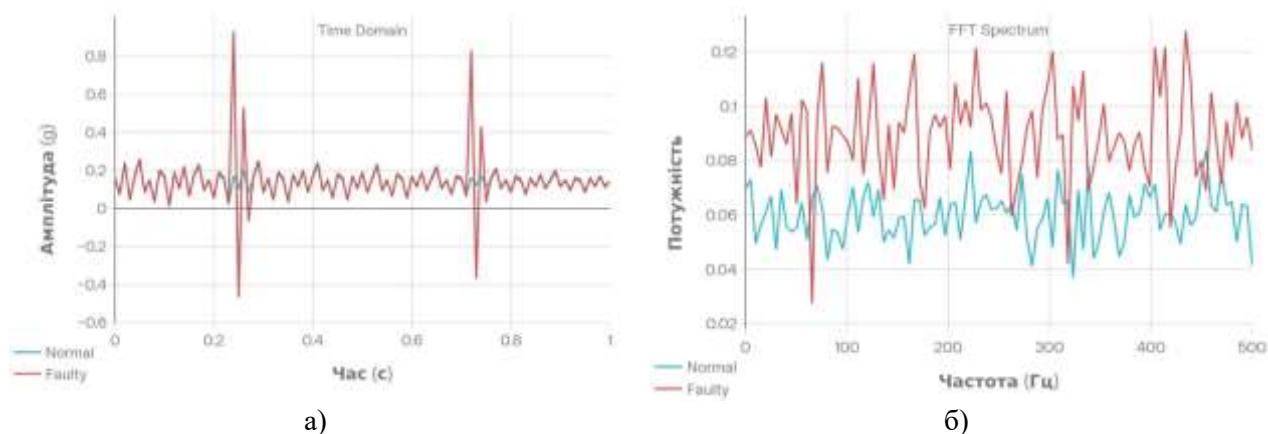


Рисунок 1 – Компютерне моделювання вібраційного процесу: а) - вібраційні сигнали справної та дефектної шарової опори; б) - спектральний аналіз справної та дефектної шарової опори

На рисунку 1 – а) "справна" (синій) та "дефектна" (червоний) осцилограми чітко видно різницю. Червона лінія для дефектного випадку має явно виражені сплески великої амплітуди, тоді як синя залишається більш-менш гладкою. Це приклад того, як люфт проявляється у часовому сигналі.

Спектральний аналіз (FFT). На рисунку 1 – б) подано амплітудні спектри обох сигналів, отримані за допомогою FFT. Для справної опори спектр показує приблизно однакову амплітуду на всіх частотах (білий шум). Для дефектної опори також спостерігається білий шум, однак з деяким підвищенням загального рівня. Явно виражених піків, які чітко вказували б на конкретну частоту дефекту, не видно. Це підтверджує, що FFT не є оптимальним для діагностики люфту, оскільки удари генерують енергію по всьому спектру, а не на окремих гармоніках. Широкопasmове підвищення шуму – це непрямий знак дефекту, але недостатнє для надійної діагностики. FFT використовується більше для допоміжного аналізу та виключення інших причин вібрації.

Розрахунок статистичних критеріїв. На наступних двох графіках представлені результати розрахунку ексцесу (Kurtosis) та пік-фактора (Crest Factor) у ковзному вікні. Синя лінія (справна опора) коливається біля значення $K \approx 3.0$ на всій тривалості запису (рис. 2 – а)). Це відповідає теоретичному значенню для гаусівського шуму. Червона лінія (дефектна опора) залишається близькою до 3.0 впродовж більшої частини часу, але в моменти ударів (біля $t = 0.25$ с та $t = 0.73$ с) різко зростає до $K \approx 9.8-10.5$. Цей стрибок абсолютно чітко вказує на наявність імпульсних подій.

На графіку (рис. 2 – б)) показана пунктирна лінія на рівні $K = 5.0$.

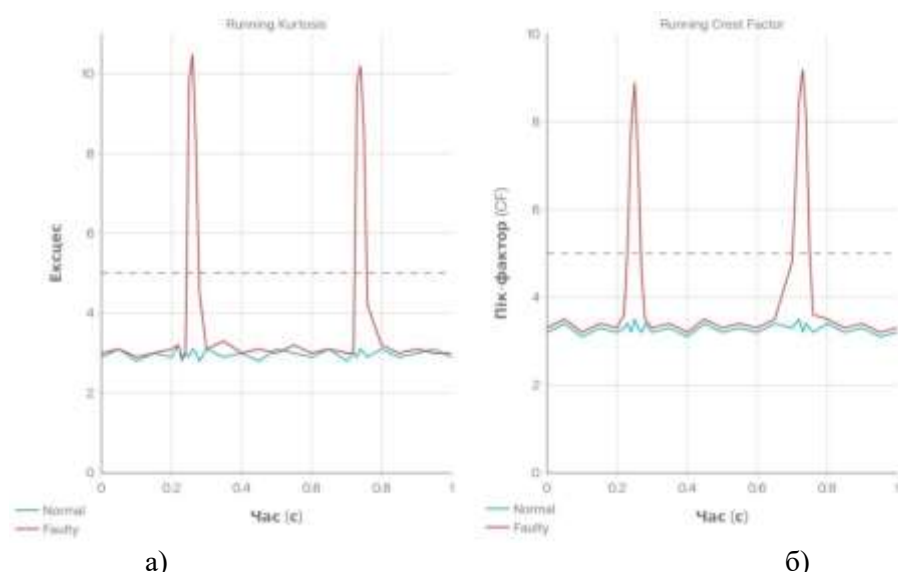


Рисунок 2 – Моделювання статистичних критеріїв: а) - зміна показника Ексцесу у часі; б) - зміна показника Пік-фактора (Crest Factor) у часі

При перевищенні цієї межі система повинна сигналізувати про ймовірний люфт. У дефектному сценарії це відбувається в моменти ударів, тоді як справна опора ніколи не перетинає це значення. Подібно до ексцесу, пік-фактор для справної опори залишається стабільним у діапазоні $CF \approx 3.2-3.5$. Для дефектної опори спостерігаються різкі піки до $CF \approx 8.5-9.2$ в моменти ударів. Поріг $K = 5.0$ також показаний пунктиром. Обидва показники (K і CF) одночасно перевищують поріг, що дає високу впевненість у наявності дефекту. Вейвлет-аналіз (CWT). На рисунку 3 представлена спектрограма дефектного сигналу, отримана за допомогою CWT з вейвлетом Морле.

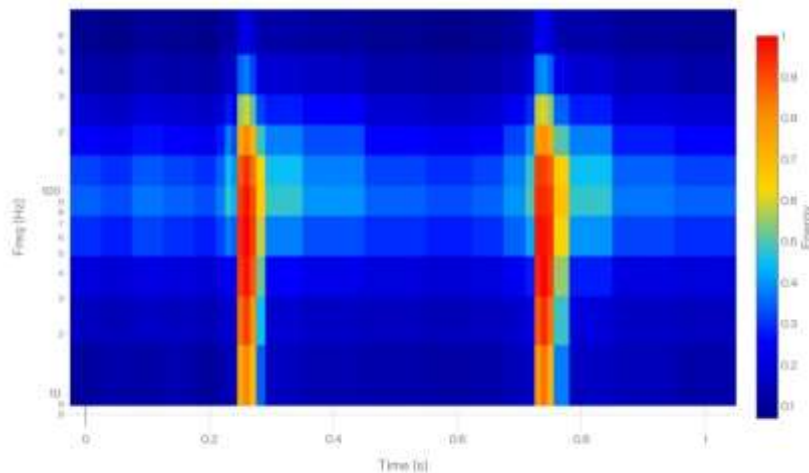


Рисунок 3 – Вейвлет-аналіз (CWT)

На фоні переважно темно-синього кольору (сигнальний фон) видно дві яскраві вертикальні смуги (жовто-червоне забарвлення) на часових позиціях біля 0.25 с та 0.73 с. Ці смуги охоплюють діапазон частот приблизно від 50 Гц до 200 Гц у вибраній шкалі масштабів. Кожна смуга відповідає одному ударному імпульсу від люфту в шаровій опорі.

На відміну від FFT-спектра (рис. 2), де удари виглядають як неспецифічне підвищення шуму, вейвлет-спектрограма чітко локалізує подію. Це демонструє переваги часо-частотного підходу для аналізу нестационарних процесів.

Результати моделювання та аналізу свідчать, що діагностика шарових опор за вібросигналами потребує поєднання кількох методів обробки. Одновимірні критерії на основі FFT виявилися недостатньо чутливими до імпульсних проявів люфту, оскільки такі прояви не формують стабільних гармонік, а лише змінюють загальний шумовий фон. Натомість використання ексцесу та пік-фактора дозволяє ефективно виявляти навіть поодинокі ударні події. Ексцес, завдяки четвертому степеню амплітуди в чисельнику, різко зростає при появі викидів і є більш чутливим до частих, але відносно невеликих ударів. Пік-фактор краще характеризує одиничні максимальні перевантаження й може застосовуватися як додатковий критерій, що уточнює ступінь небезпеки режиму. Вейвлет-перетворення доповнює статистичний аналіз, забезпечуючи часо-частотну локалізацію подій. Це особливо важливо в умовах експлуатації, коли на сигнал впливають численні зовнішні фактори. Візуальний аналіз вейвлет-спектрограм дозволяє експерту відрізнити удари, зумовлені конструктивними дефектами шарової опори, від випадкових зовнішніх впливів.

Висновки. Таким чином, запропонований комплексний підхід – використання ексцесу та пік-фактора в часовій області разом із вейвлет-аналізом – є обґрунтованим та перспективним для побудови систем вібродіагностики шарових опор автомобіля. У подальших дослідженнях доцільно провести експериментальну підтвердження методики на реальних автомобілях, визначити статистично обґрунтовані порогові значення діагностичних показників та дослідити чутливість запропонованих критеріїв до різних типів дефектів і режимів навантаження.

Інформаційні джерела

1. Михалків С., Жалкін Д., Жалкін С., Равлюк В. "Визначення інформативних складових методом швидкої ексцесограми для вібродіагностування підшипників кочення," *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*, вип. 39, 2022. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/15129/1/Mykhalkiv.pdf> (дата звернення: 05.01.2026 р.).

2. "Вібродіагностика підшипникових вузлів папероробних машин," *Теоретична та дослідна механіка*, 2022. URL.: <https://ten.ztu.edu.ua/article/view/282191/276371> (дата звернення: 09.01.2026 р.).
3. "Time vs. Frequency Domain," *Vibration Research University*, 2025. URL: <https://vru.vibrationresearch.com/lesson/time-vs-frequency-domain/> (дата звернення: 11.02.2026 р.)
4. Передерко О. М. "Обробка та аналіз вібраційних сигналів для діагностики технічного стану машинних агрегатів," Дисертація на здобуття наукового ступеня, Сумський державний університет, 2024. URL: https://suitt.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/dysertatsiia_perederko.pdf (дата звернення: 08.03.2026 р.).
5. "Частотно-часовий аналіз вібросигналів з використанням перетворення Фур'є та вейвлет-методів," *Національна академія наук України. Інститут кібернетики*. URL: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/bitstreams/7accb3f5-8447-4ab0-b4ac-05d5ee569f4e/download>
6. Баранов А. В. "Вейвлет-перетворення для автоматичної детекції та аналізу аномалій у техніці," Електронна видавнича система, Харківський національний автомобільно-дорожний університет, 2019. URL: <http://eprints.kname.edu.ua/70312/1/Баранов.pdf> (дата звернення: 14.03.2026 р.).
7. "Вейвлет," *Вільна енциклопедія Вікіпедія*, останнє оновлення: 14 січня 2005 р. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Вейвлет> (дата звернення: 12.02.2026 р.).

Дата першого надходження
статті до видання
14.04.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
20.05.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.

УДК 519.6:622.691.4

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-7

Матіко Ф. Д., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6569-2587>Данильців Б. М., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-8811-5189>

Національний університет «Львівська політехніка»

МЕТОДИКА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СТАЦІОНАРНОГО РЕЖИМУ РУХУ ГАЗУ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

У статті обґрунтовано доцільність уточнення параметрів математичної моделі стаціонарного режиму руху природного газу в магістральному газопроводі на основі експериментальних даних. Встановлено, що застосування довідкових значень коефіцієнта гідравлічного опору та коефіцієнта теплопередачі від газу до ґрунту без їх уточнення призводить до значних похибок моделювання. Розроблено методику ідентифікації цих коефіцієнтів як єдиної задачі мінімізації у просторі двох параметрів із цільовою функцією у вигляді суми квадратів нормованих відхилень розрахункових значень тиску і температури на виході газопроводу від їх експериментальних значень. За результатами оптимізації удосконалено формулу для обчислення коефіцієнта гідравлічного опору λ та отримано значення коефіцієнта теплопередачі для умов прокладання досліджуваного газопроводу ($3,71 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$). Підтверджено адекватність уточненої моделі шляхом порівняння розрахункових значень тиску і температури на виході газопроводу з експериментальними значеннями: відносне відхилення тиску не перевищує 0,38 %, температури - 0,01 %. Розроблену методику пропонується застосовувати для уточнення параметрів моделей інших газопроводів, а отримані розподіли тиску й температури - як граничні умови для математичної моделі нестационарного режиму руху газу.

Ключові слова: магістральний газопровід, математична модель, стаціонарний режим, коефіцієнт гідравлічного опору, коефіцієнт теплопередачі, ідентифікація параметрів, експериментальні дослідження.

Постановка проблеми. Сучасні методи виявлення та локалізації витоків у газотранспортних мережах базуються на застосуванні математичних моделей нестационарного руху газу [1]. Використання таких моделей дозволяє не лише виявити наявність витоку в режимі реального часу, а й визначити його розташування (з точністю 97-99%) та оцінити величину втрат газу (92-98% точності) [1]. Метод, представлений у роботі [1], демонструє ефективність комплексного підходу до моніторингу газових мереж, який включає три основні етапи: ідентифікацію витоку, визначення його величини та локалізацію місця пошкодження.

Однак практичне застосування моделей нестационарного режиму є складною та трудомісткою задачею, яка потребує значних обчислювальних ресурсів та ретельної попередньої підготовки. Ключовою проблемою є необхідність точної ідентифікації параметрів моделі перед її використанням для ідентифікації витоків. Як зазначається в статті [1], перед виявленням витоку обов'язково має бути виконана ідентифікація моделі на основі трьох основних параметрів: коефіцієнта гідравлічного опору λ , коефіцієнта стисливості z та густини газу ρ .

Серед цих параметрів коефіцієнт гідравлічного опору λ характеризується найбільшою невизначеністю і суттєво впливає на точність розрахунку перепадів тиску вздовж трубопроводу [1]. Дослідження показують, що для сталевих труб, які використовуються в газотранспортних системах, абсолютна шорсткість може варіюватися в широкому діапазоні — від 0,045 мм до 3,0 мм [1], що безпосередньо впливає на величину коефіцієнта гідравлічного опору. Неправильне визначення цього параметра може призвести до значних похибок у розрахунках або навіть до пропуску невеликих витоків [1].

Таким чином, перед застосуванням складних моделей нестационарного режиму для виявлення та локалізації витоків необхідно провести ретельне уточнення параметрів на основі експериментальних даних. Застосування спрощених моделей стаціонарного режиму на етапі калібрування дозволяє ефективно визначити базові параметри системи з меншими обчислювальними витратами. Отримані в результаті такого калібрування параметри можуть бути надалі використані в моделях нестационарного режиму, забезпечуючи їх високу точність та надійність при виявленні витоків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У багатьох роботах автори застосовують математичні моделі стаціонарного руху газу для отримання вихідних даних (наприклад, граничних умов) для розв'язування моделей нестационарного режиму руху газу. Зокрема, у роботі [2] подано класичний підхід до моделювання газопровідних мереж у стаціонарному режимі. Автор розглядає чисельні методи для визначення рівноважного розподілу тисків і витрат та підкреслює, що ці результати можуть використовуватися як початкові умови для складніших аналізів нестационарного режиму. Це стало основою для подальших досліджень з перевірки та калібрування параметрів.

У монографії [3] показано фундаментальну різницю між усталеним і нестационарним режимами. Автори пояснюють, які фізичні явища втрачаються при усередненні в часі, і наголошують, що моделі стаціонарного режиму не відображають хвильові процеси, проте можуть використовуватися для контролю вхідних даних перед складними розрахунками.

Автори статті [4] виконали аналіз нестационарних процесів у газопроводах та застосували рішення стаціонарного типу, отримані методом Ньютона–Рафсона, як вихідний стан для нестационарних симуляцій. Показано, що без попередньої стаціонарної ініціалізації чисельна стійкість розрахунків порушується.

У роботі [5] запропоновано об'єктно-просторову модель для нестационарного аналізу. Автори наголошують, що застосування стаціонарних рішень як початкових умов є необхідним для уникнення нестабільності під час інтегрування нестационарних задач. Редукована модель трубопроводів, запропонована у статті [6], ґрунтується на попередньому використанні стаціонарних розрахунків для вирівнювання параметрів перед застосуванням спрощених моделей нестационарного типу, що дозволяє зменшити похибку.

Дослідження [7] об'єднує застосування методів CFD-моделювання у поєднанні з результатами експериментальних вимірювань. Отримані стаціонарні профілі швидкостей та фазових розподілів використовуються як основа для подальшого калібрування динамічних розрахунків. У роботі [8] також представлено результати експериментів за впливу низького тиску. Автори спершу калібрують постійні коефіцієнти на основі стаціонарних вимірів, після чого перевіряють відповідність часових рядів моделі та експерименту.

У статті [9] формалізовано задачу стаціонарних розрахунків для неідеальних газів. Автори доводять існування та унікальність розв'язків, що є важливим для формування надійної початкової умови перед нестационарним аналізом.

Автори роботи [10] пропонують для застосування онлайн-симулятор нестационарних процесів з оптимізаційною ідентифікацією параметрів. Для ініціалізації та пришвидшення оцінок використовуються стаціонарні рішення, що узгоджуються з результатами експериментальних вимірювань. У технічних звітах [11] також підкреслено роль моделей стаціонарного типу у швидких перевірках, калібруванні параметрів і оптимізації режимів. Автори наголошують, що стаціонарні розрахунки не можуть повністю замінити моделювання нестационарного типу, але вони є критично важливим підготовчим етапом.

У роботі [12] стаціонарні розрахунки використовуються для лінеаризації системи навколо усталеного стану, після чого будуються передавальні функції для швидкого прогнозування динамічної поведінки. Цей підхід широко застосовують у поєднанні з експериментальними даними для калібрування характеристик.

Отже, у низці публікацій [2-13], присвячених математичному моделюванню нестационарних процесів у газопроводах та експериментальній перевірці моделей нестационарного типу, описано практику поєднання стаціонарних розрахунків із експериментальними розподілами тиску, температури і витрати. У багатьох роботах застосовано калібрування параметрів математичних моделей на базі аналізу стаціонарного режиму руху газу, а також реалізацію нестационарних розрахунків на основі результатів стаціонарного моделювання, що підтверджує актуальність теми цієї статті.

Метою цієї статті є розроблення методики ідентифікації параметрів математичної моделі стаціонарного режиму руху газу на основі експериментальних даних для подальшого використання результатів моделювання для розв'язування моделей нестационарного режиму руху газу та виявлення витоків.

Застосування моделі стаціонарного руху газу для побудови розподілів тиску та температури вздовж газопроводу. Використаємо удосконалену математичну модель руху природного газу у газопроводі яка є системою диференціальних рівнянь зміни тиску та температури газу вздовж газопроводу, що доповнена рівнянням стану реального газу [12]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp}{dx} &= - \left[\frac{M \cdot g \cdot \Delta y \cdot p^2}{z \cdot R \cdot T \cdot L} + \frac{8 \cdot \lambda \cdot q_m^2 \cdot z \cdot R \cdot T}{M \cdot \pi^2 \cdot D^5} \right] \Bigg/ \left(p - \frac{16 \cdot q_m^2 \cdot z \cdot R \cdot T}{p \cdot M \cdot \pi^2 \cdot D^4} \right); \\ z &= f(p, T, w_a, w_y, \rho_c); \\ \frac{dT}{dx} &= - \left[\frac{k_t \cdot \pi \cdot D_z}{q_m \cdot c_p} (T - T_{gp}) - \left(D_i + \frac{16 \cdot q_m^2 \cdot z^2 \cdot R^2 \cdot T^2}{c_p \cdot M^2 \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot p^3} \right) \frac{dp}{dx} + \frac{g \cdot \Delta y}{c_p \cdot L} \right]. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де ρ – густина природного газу;

p – тиск природного газу в газопроводі;

g – прискорення вільного падіння;

q_m – масова витрата природного газу;

z – фактор стисливості природного газу;

M – молярна маса природного газу;

R – газова стала;

T – абсолютна температура природного газу;

Δy – різниця кінцевої y_2 та початкової y_1 висот розміщення газопроводу;

L – довжина газопроводу;

D – внутрішній діаметр газопроводу;

λ – коефіцієнт гідравлічного опору;

D_i – коефіцієнт Джоуля–Томсона;

c_p – ізобарна теплоємність природного газу;

T_{gp} – абсолютна температура ґрунту;

k_t – коефіцієнт теплопередачі від газу до ґрунту;

D_z – зовнішній діаметр газопроводу;

ρ_c – густина природного газу за стандартних умов;

w_a – молярна частка азоту; w_y – молярна частка діоксиду вуглецю.

Застосуємо наведену математичну модель для моделювання газопроводу та дослідження зміни параметрів газу вздовж газопроводу.

Під час моделювання в середовищі Matlab застосовано експериментальні дані, отримані з горизонтального магістрального трубопроводу (нахил газопроводу 0°) без відборів і витоків довжиною 122 км. Внутрішній діаметр трубопроводу – 1388 мм. Часовий інтервал між точками вимірювання – 2 год. Отримані експериментальні дані представлено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень параметрів газу у магістральному газопроводі

| № | Тиск на вході трубопроводу, P_0 , атм | Об'ємна витрата зведена до стандартних умов, Q , тис. м ³ /год | Тиск на виході трубопроводу, P_k , атм |
|---|---|---|--|
| 1 | 66,5 | 3 492 | 48,3 |
| 2 | 66,6 | 3 506 | 48,5 |
| 3 | 66,4 | 3 484 | 48,3 |
| 4 | 66,2 | 3 479 | 48,2 |
| 5 | 66,1 | 3 459 | 48,0 |

Експериментальні дослідження виконано за таких умов:

- густина газу за стандартних умов: 0,682 кг/м³;

- температура газу на виході трубопроводу: 26 °С;

- температура газу на вході трубопроводу: 40 °С;

- температура ґрунту на початковій ділянці трубопроводу: 26 °С.

Для набору даних 1 із таблиці 1 проведено моделювання розподілу тиску по довжині трубопроводу при стаціонарному режимі руху газу та виконано порівняння збіжності експериментального та розрахункового значення тиску в кінці ділянки газопроводу. З таблиці 1 видно, що експериментальне значення тиску газу у кінцевій точці газопроводу рівне 48,3 атм, експериментальне значення температури газу – 26 °С.

За результатами моделювання руху газу у газопроводі отримано розподіли тиску та температури по довжині газопроводу, що представлені на рисунку 1.

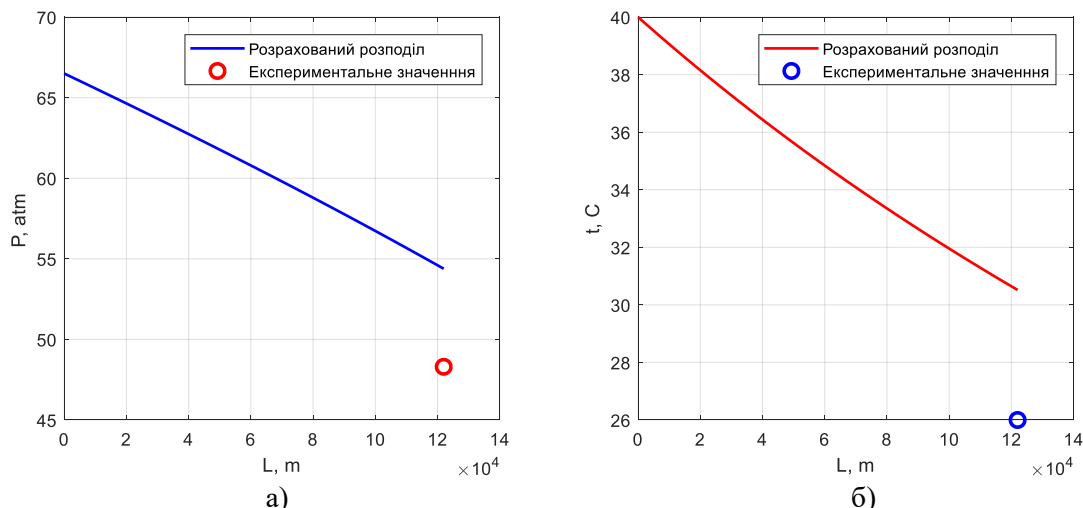


Рисунок 1 - Розподіли параметрів газу вздовж магістрального газопроводу при стаціонарному режимі руху газу: а) розподіл тиску; б) розподіл температури

Як видно з рисунка 1, розрахункові та експериментальні значення тиску та температури газу в кінці газопроводу значно відрізняються. У таблиці 2 представлено абсолютні та відносні відхилення для цих параметрів. Такі значні відхилення, на думку авторів, зумовлені тим, що в математичній моделі застосовано низку довідкових значень фізичних величин, які не відповідають реальному стану досліджуваного магістрального газопроводу. Насамперед це коефіцієнт гідравлічного опору λ , який значно впливає на гідродинамічні характеристики потоку газу та на розподіл тиску, а також коефіцієнта теплопередачі від газу до ґрунту k_t , який залежить від характеристик стінки газопроводу, його ізоляції, ґрунту та також значно впливає на розподіл температури вздовж газопроводу.

Таблиця 2 – Таблиця порівняння розрахункових та експериментальних значень тиску і температури газу в кінці газопроводу

| Позначення параметра | Експериментальне значення | Розрахункове значення | Абсолютна похибка Δ | Відносна похибка, % |
|----------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------|
| P, атм | 48,3 | 54,3 | 6,0 | 12,6 |
| t, °C | 26,0 | 30,5 | 4,5 | 17,3 |

Методика ідентифікації параметрів математичної моделі стаціонарного режиму руху газу та її перевірка. Для удосконалення математичної моделі та отримання адекватних результатів моделювання для досліджуваного магістрального газопроводу необхідно уточнити значення коефіцієнтів системи диференціальних рівнянь, а саме - коефіцієнта гідравлічного опору λ та коефіцієнта теплопередачі від газу до ґрунту k_t .

Оскільки досліджуваний магістральний газопровід експлуатують при великих значеннях витрати газу, то режим руху газу у цьому газопроводі є розвиненим турбулентним, відповідно зі значенням числа Рейнольдса $Re = 4,68 \times 10^7$. Для таких умов коефіцієнт гідравлічного опору доцільно обчислювати за формулою Філоненка [14]:

$$\lambda = (0,79 \cdot \ln(Re) - 1,64)^{-2}, \quad (2)$$

де константа 0,79 – це коефіцієнт, що визначає швидкість зменшення λ зі зростанням Re [14]; 1,64 – емпірична константа, що узгоджує криву $\lambda(Re)$ з експериментальними даними; її фізичний зміст пов'язаний з впливом в'язкого підшару біля стінки трубопроводу [14]; Re - число Рейнольдса, яке доцільно визначати за формулою:

$$Re = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot \mu \cdot D} \quad (3)$$

У формулі (3) μ - динамічна в'язкість природного газу.

З аналізу формули (2) видно, що для удосконалення математичної моделі (1) і, відповідно, уточнення розподілу тиску вздовж газопроводу потрібно визначити вільну константу у рівнянні (2) на основі експериментальних даних про розподіл тиску. Слід відмітити, що застосувавши

рівняння (2) для умов експлуатації газопроводу, які відповідають набору даних 1 із таблиці 1, коефіцієнт гідравлічного опору дорівнює $\lambda = 6,5 \cdot 10^{-3}$.

На відміну від коефіцієнта гідравлічного опору, коефіцієнт теплопередачі від газу до ґрунту k_t задають як константу математичної моделі, оскільки методика його аналітичного визначення складна. Коефіцієнт теплопередачі від газу до навколишнього середовища залежить від умов прокладання газопроводу. При підземному прокладанні коефіцієнт теплопередачі залежить як від глибини закладання, діаметра газопроводу та технологічних особливостей транспортування природного газу, так і від теплофізичних характеристик та вологості ґрунту. Тому для кожного окремого газопроводу величину потрібно визначати експериментально.

Якщо дані про густину, вологість та температуру ґрунту відсутні, то для розрахунку розподілу температури по довжині магістрального газопроводу застосовують значення коефіцієнта теплопередачі, визначені експериментально для різних типів ґрунтів: для сухого піску $k_t = 1,16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; для сирого піску $k_t = 3,49 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для вогкуватої глини $k_t = 1,45 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [15].

Оскільки коефіцієнти k_t та λ одночасно впливають на розподіл як температури, так і тиску вздовж газопроводу, їх послідовне уточнення призводить до некоректних результатів через взаємозалежність рівнянь системи — тому уточнення цих параметрів доцільно виконати як єдину задачу мінімізації у просторі двох параметрів. Цільова функція являє собою суму квадратів нормованих відхилень розрахункових значень тиску та температури на виході газопроводу від їх експериментальних значень, що забезпечує рівнозначний внесок обох величин незалежно від їх розмірності. Для оптимізації значень коефіцієнтів k_t та λ застосовано функцію `fmincon` пакета MATLAB Optimization Toolbox, яка реалізує метод внутрішньої точки з підтримкою двосторонніх обмежень параметрів — це дозволяє утримувати пошук у фізично допустимій області та уникнути збіжності до нефізичних розв'язків.

В результаті оптимізації уточнено значення вільної константи у рівнянні (2). Уточнене рівняння має вигляд:

$$\lambda = (0,79 \cdot \ln(Re) - 3,712)^{-2}, \quad (4)$$

Застосувавши формулу (4) та число Re , яке відповідає набору даних 1 із таблиці 1, отримано значення коефіцієнта гідравлічного опору $\lambda = 9,4 \cdot 10^{-3}$. Також за результатами оптимізації отримано значення коефіцієнта теплопередачі $k_t = 3,739 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. За результатами застосування математичної моделі (1) з уточненими коефіцієнтами k_t і λ та моделювання руху газу у газопроводі отримано розподіли тиску та температури по довжині газопроводу, що представлені на рисунку 2.

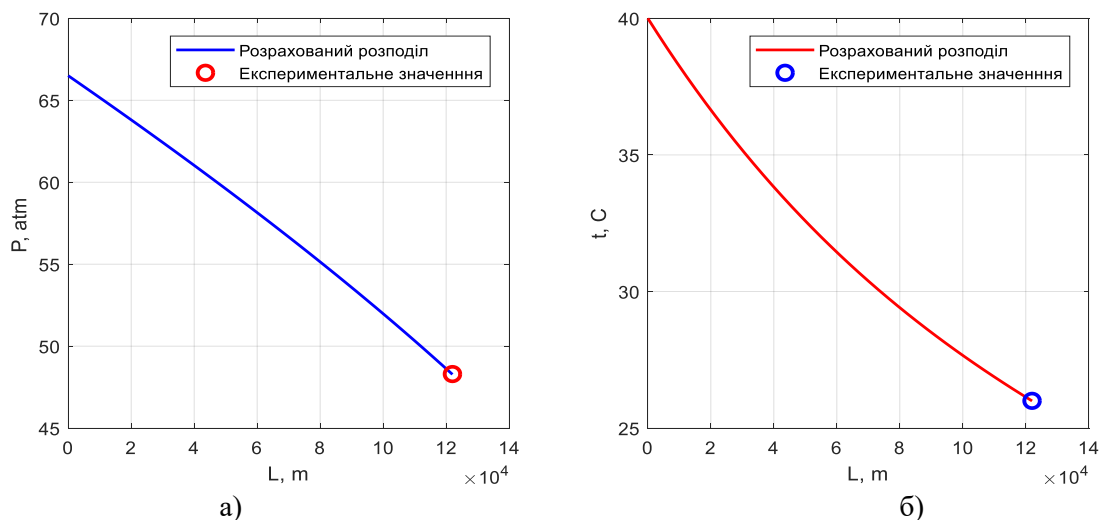


Рисунок 2 – Розподіли параметрів газу вздовж магістрального газопроводу, отримані за моделлю із уточненими коефіцієнтами k_t та λ : а) розподіл тиску; б) розподіл температури

Як видно з рисунка 2, розрахункові та експериментальні значення тиску та температури газу в кінці газопроводу добре узгоджуються. У таблиці 3 представлено абсолютні та відносні відхилення розрахункових та експериментальних значень цих параметрів. Відносне відхилення

тиску становить – 0,04%, температури – -0,01%, що підтверджує адекватність розробленої математичної моделі.

Таблиця 3 – Таблиця порівняння експериментальних значень із розрахованими після уточнення коефіцієнтів k_t і λ

| | Експериментальне значення | Розраховане значення | Абсолютна похибка Δ | Відносна похибка % |
|--------|---------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|
| Р, атм | 48,3 | 48,2 | -0,020 | -0,04 |
| t, °C | 26,0 | 25,9 | -0,003 | -0,01 |

Також було проведено моделювання для решти наборів експериментальних даних із таблиці 1. Для наборів даних відносна похибка за тиском на виході газопроводу не перевищує 0,383%, що є прийнятним результатом для інженерних розрахунків магістральних газопроводів.

Таблиця 4 – Порівняння розрахованих і експериментальних значень

| Тиск на вході трубопроводу, Р ₀ , атм | Об'ємна витрата зведена до стандартних умов, Q, тис. м ³ /год | Тиск на виході трубопроводу, Р _к , атм | Розрахований тиск на виході трубопроводу, атм | Абсолютна похибка Δ , атм | Відносна похибка % |
|--|--|---|---|----------------------------------|--------------------|
| 66,6 | 3 506 | 48,5 | 48,348 | - 0,0015 | - 0,003 |
| 66,4 | 3 484 | 48,3 | 48,319 | 0,019 | 0,039 |
| 66,2 | 3 479 | 48,2 | 48,097 | 0,102 | 0,211 |
| 66,1 | 3 459 | 48,0 | 48,184 | 0,184 | 0,383 |

Отже, удосконалене рівняння (4) відображає реальний стан внутрішньої поверхні досліджуваного газопроводу. Отримане значення коефіцієнта гідравлічного опору $\lambda = 0,0092$ перевищує значення для ідеально гладкої труби $\lambda = 0,0065$, що відповідає збільшенню еквівалентної шорсткості стінки внаслідок експлуатації газопроводу. Згідно з [14], після одного року використання в газопроводах еквівалентна шорсткість безшовних сталевих труб становить $\Delta = 0,12$ мм, а після кількох років може досягати 0,20 мм, що і зумовлює підвищення коефіцієнта гідравлічного опору порівняно з теоретичним значенням для нової труби. Отримана формула (4) забезпечує низьку похибку обчислення коефіцієнта гідравлічного опору λ для досліджуваного газопроводу.

Уточнене значення коефіцієнта теплопередачі $k_t=3,739$ Вт/(м²·К) узгоджується з довідниковими даними. За даними [15], коефіцієнт теплопередачі від газу до ґрунту для сирого піску становить $k_t=3,0$ ккал/(год·м²·°C), що відповідає $k_t=3,49$ Вт/(м²·К). Дещо вище оптимізоване значення може пояснюватися підвищеною вологістю ґрунту вздовж траси досліджуваного газопроводу.

Висновки. У статті розроблено та апробовано методику ідентифікації параметрів математичної моделі стаціонарного режиму руху природного газу в магістральному газопроводі на основі експериментальних даних. Показано, що застосування довідкових значень коефіцієнта гідравлічного опору λ та коефіцієнта теплопередачі k_t без їх уточнення на основі експериментальних даних призводить до значних похибок моделювання.

Запропонований підхід до одночасної оптимізації обох параметрів як єдиної задачі мінімізації у просторі двох змінних дозволяє уникнути некоректних результатів, зумовлених взаємозалежністю рівнянь системи при послідовному уточненні. В результаті оптимізації отримано уточнену формулу коефіцієнта гідравлічного опору та значення коефіцієнта теплопередачі $k_t = 3,712$ Вт/(м²·К), які забезпечують відносну похибку моделювання за тиском не більше 0,383% та за температурою не більше 0,01% для досліджуваного газопроводу.

Отримані розподіли тиску і температури вздовж трубопроводу можуть бути використані як граничні умови для розв'язування математичної моделі нестационарного руху газу параболічного типу та реалізації методу виявлення і локалізації витоків газу для автоматизованої системи моніторингу стану газопроводів у реальному часі.

Інформаційні джерела

1. Kwestarz, Małgorzata Amanda, Osiadacz, Andrzej Janusz, Kotyński, Łukasz Method for leak detection and location for gas networks. *Archives of Mining Sciences* [online]. 2019, no. 64, (1), pp. 131–150. Available from: doi: 10.24425/ams.2019.126276
2. A. J. Osiadacz, *Simulation and Analysis of Gas Networks*. London: E. & F. N. Spon, 1987.
3. E. B. Wylie and V. L. Streeter, *Fluid Transients in Systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993.
4. Z. Hafsi, L. Ayed, and S. Elaoud, "Characteristic mesh grid method for transient analysis of natural gas flow in pipeline networks," *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 53–64, 2020. [Online]. Available: https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/fullb74_244588.pdf
5. R. Alamian, M. Behbahani-Nejad, and A. Ghanbarzadeh, "A state space model for transient flow simulation in natural gas pipelines," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 9, pp. 51–59, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2012.06.005>
6. K. Wen, Z. Xia, W. Yu, and J. Gong, "A new lumped parameter model for natural gas pipelines in state space," *Energies*, vol. 11, no. 9, pp. 1–18, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en11092440>
7. M. B. Martínez, P. L. Gómez, and D. R. Vallejo, "CFD study and experimental validation of low liquid-loading multiphase flow in a pipeline," *Processes*, vol. 8, no. 12, pp. 1–19, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/pr8121639>
8. H. Mnasri, S. Elaoud, L. Ayed, and S. Hafsi, "Low pressure experimental validation of low-dimensional multiphase pipeline model," *Fluids*, vol. 6, no. 5, pp. 1–17, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/fluids6050193>
9. S. Srinivasan, K. Sundar, V. Gyrya, and A. Zlotnik, "Numerical solution of the steady-state network flow for non-ideal gas," *arXiv preprint arXiv:2203.12345*, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2203.12345>
10. X. Yin, Y. Zhang, T. Chen, and Z. Wang, "A high-accuracy online transient simulation framework of natural gas pipeline network," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 107, p. 104800, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2023.104800>
11. Emerson, "Fundamental differences between steady-state and transient flow simulation," *Technical White Paper*, Emerson Automation Solutions, 2019. [Online]. Available: <https://www.emerson.com/documents/automation/article-fundamental-differences-between-steady-state-transient-simulation-en-131124.pdf>
12. S. S. Rao and H. K. Versteeg, "Analysis of a model of a natural gas pipeline—a transfer function approach," *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, vol. 5, no. 1, pp. 1–25, 2021. [Online]. Available: <https://academic.oup.com/imatrm/article/5/1/tnab002/6421330>
13. Алгоритм визначення обсягів втрат природного газу за умови вимірювання його параметрів на виході газопроводу / Матіко Ф. Д., Джигирей В. О., Костик І. В., Данильців Б. М. / Вісник КПІ. Серія Приладобудування : збірник наукових праць. 2023. Вип. 66(2). С. 66-74.
14. Idelchik, I. E. (2007). *Handbook of Hydraulic Resistance*. 4th ed. Begell House, New York.
15. Білецький В. С., Фик М. І. Основи транспорту природних вуглеводнів : Підручник / За заг. ред. І. М. Фика. Львів : Новий Світ-2000, 2019. 274 с. (електронна версія: <https://ev.vue.gov.ua/wp-content/uploads/2023/11/Osnovy-transportu-pryrodneykh-vuhlevodiv-10.10.2019.pdf>).

UDC 519.6:622.691.4

Matiko F., Danyltsiv B.

Lviv Polytechnic National University

TECHNIQUE FOR PARAMETER IDENTIFICATION FOR MATHEMATICAL MODEL OF STEADY-STATE GAS FLOW BASED ON EXPERIMENTAL DATA

The article substantiates the need to identify the parameters of a mathematical model of steady-state natural gas flow in a main gas pipeline using experimental data. It is established that using reference values for the hydraulic resistance coefficient and the gas-to-soil heat transfer coefficient without their identification leads to significant modeling errors. A methodology has been developed for identifying these coefficients as a single minimization problem in the space of two parameters, with an

objective function defined as the sum of squared normalized deviations of the calculated pressure and temperature values at the pipeline outlet from their experimentally measured values. Based on the minimization results, the formula for calculating the hydraulic resistance coefficient λ has been improved, and the heat transfer coefficient has been determined for the pipeline's laying conditions (3.71 W/(m²·K)). The adequacy of the model with identified parameters has been confirmed by comparing the calculated pressure and temperature at the pipeline outlet with the experimental data; the relative deviations do not exceed 0.38% for pressure and 0.01% for temperature. The developed technique is recommended for identifying model parameters for other gas pipelines, while the obtained pressure and temperature distributions can serve as boundary conditions for a mathematical model of non-steady gas flow.

Keywords: *main gas pipeline, mathematical model, steady-state mode, hydraulic resistance coefficient, heat transfer coefficient, parameter identification, experimental research.*

Дата першого надходження
статті до видання
21.04.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
18.05.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.

УДК 623.746.1:623.64:621.391.31

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-8

Решетило О. М., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2555-4205>

Луцький національний технічний університет

МЕТОДИ БОРОТЬБИ З БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ОПТОВОЛОКОННИЙ КАНАЛ КЕРУВАННЯ

У статті розглянуто сучасні методи боротьби з безпілотними літальними апаратами, що використовують оптоволоконний канал керування. Проаналізовано принципи їх функціонування, технічні особливості, переваги та недоліки у порівнянні з радіокерованими безпілотними літальними апаратами. Визначено основні загрози, що створюють дані безпілотні літальні апарати для військових та цивільних об'єктів. Систематизовано методи протидії, що включають: фізичне знищення, механічне пошкодження каналу зв'язку, використання дронів-перехоплювачів та інженерні засоби захисту. Особливу увагу приділено перспективам використання Штучного інтелекту та автоматизованих систем виявлення.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; оптоволоконний канал керування; антидронові технології; протидія БПЛА; радіоелектронна боротьба; захист об'єктів.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) суттєво змінив характер сучасних військових операцій та підходи до забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури. Особливу увагу останнім часом привертають БПЛА з оптоволоконним каналом керування, який забезпечує передачу команд і даних через фізичне волоконно-оптичне з'єднання між оператором та безпілотним апаратом. Така технологія дозволяє значно підвищити стійкість БПЛА до впливу засобів радіоелектронної боротьби, які традиційно є одним із ключових інструментів протидії безпілотним системам.

На відміну від класичних радіокерованих БПЛА, вони практично не залежать від радіочастотного середовища, що ускладнює їх виявлення, придушення та нейтралізацію існуючими антидроновими засобами. Це створює нові виклики для систем протиповітряної оборони, підрозділів безпеки та інженерного захисту об'єктів. Особливо актуальною ця проблема є в умовах сучасних бойових дій, де застосування таких технологій демонструє високу ефективність при виконанні розвідувальних, ударних та диверсійних завдань.

Наявні методи боротьби з БПЛА переважно орієнтовані на протидію радіокерованим БПЛА і не забезпечують належного рівня ефективності захисту від БПЛА з оптоволоконним каналом керування. У зв'язку з цим виникає потреба у розробленні та впровадженні нових підходів до виявлення, супроводу та знешкодження таких безпілотників, які повинні базуватися на комплексному поєднанні технічних, інженерних та організаційних рішень.

Таким чином, актуальність дослідження обумовлена необхідністю аналізу сучасних загроз, що пов'язані із застосуванням БПЛА з оптоволоконним каналом керування, та визначення ефективних методів боротьби з ними для підвищення рівня захисту військових і цивільних об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика застосування та протидії безпілотним літальним апаратам (БПЛА), зокрема з оптоволоконним каналом керування, останніми роками стала предметом активних наукових досліджень як у військово-технічній, так і в цивільній сферах. Це обумовлено стрімким розвитком безпілотних технологій та появою нових технічних рішень, що дозволяють підвищити стійкість систем керування до впливу засобів радіоелектронної боротьби.

У фундаментальній праці Wang, Liu та Song здійснено комплексний огляд сучасних систем протидії БПЛА, де визначено основні напрями розвитку засобів виявлення, супроводу та нейтралізації БПЛА, включаючи акустичні, радіолокаційні, оптичні та фізичні методи знешкодження [1].

Поява БПЛА на оптоволоконному керуванні спричинила окремий напрям досліджень. У роботі Pham Minh Thang та Nguyen Van Hieu розглянуто технічні рішення переходу від традиційного радіокерування до волоконно-оптичних каналів передачі команд, що забезпечують високу завадостійкість, низьку затримку сигналу та захищеність інформації [2]. Подібні результати наведено у дослідженні Suleimenov та співавторів, де оптоволоконний канал розглядається як перспективний спосіб захищеного керування групами БПЛА [3].

Окрему увагу науковці приділяють практичному застосуванню таких систем у бойових умовах. У роботі Тутаренко та співавторів проаналізовано досвід України щодо використання БПЛА з оптоволоконним каналом керування, а також запропоновано нетрадиційні методи протидії таким загрозам, серед яких інженерні бар'єри, засоби фізичного враження та використання перехоплювачів [4].

У дослідженні Klushyn запропоновано концепцію комбінованого керування БПЛА в умовах активного застосування засобів радіоелектронної боротьби, де використання оптоволоконного каналу розглядається як ефективний інструмент забезпечення «тихого» керування без радіовипромінювання [5].

Перспективи розвитку засобів протидії, що пов'язані з використанням високотехнологічних систем ураження. Зокрема, дослідження українських науковців присвячені оцінці впливу лазерної зброї на композитні матеріали корпусів БПЛА, що підтверджує перспективність лазерних систем у складі антидронових комплексів [6].

Незважаючи на значну кількість публікацій у сфері протидії БПЛА, аналіз літературних джерел показує, що питання боротьби з БПЛА з оптоволоконним каналом керування залишаються недостатньо дослідженими. Більшість сучасних антидронових систем орієнтовані на нейтралізацію радіокерованих платформ, що обумовлює необхідність подальших досліджень, розроблення нових методів виявлення та знешкодження БПЛА даного типу.

Мета статті. Метою статті є аналіз сучасних загроз, пов'язаних із застосуванням БПЛА з оптоволоконним каналом керування, а також дослідження та систематизація існуючих методів боротьби з такими дронами для підвищення ефективності захисту військових і цивільних об'єктів.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати принципи функціонування та технічні особливості БПЛА на оптоволоконні;
- визначити основні переваги та недоліки БПЛА з оптоволоконним каналом керування порівняно з традиційними радіокерованими;
- дослідити основні загрози, які створюють БПЛА даного типу в умовах сучасних бойових дій та для об'єктів критичної інфраструктури;
- систематизувати існуючі методи виявлення та нейтралізації таких БПЛА, включаючи: фізичні, механічні, інженерні та автоматизовані засоби протидії;
- оцінити перспективи застосування сучасних технологій, зокрема штучного інтелекту, роботизованих комплексів та інтегрованих антидронових систем для підвищення ефективності боротьби з БПЛА.

Практична значущість дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів для вдосконалення існуючих систем захисту, розроблення нових технічних рішень та формування ефективної стратегії протидії БПЛА з оптоволоконним каналом керування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасний розвиток БПЛА характеризується постійним вдосконаленням систем керування, навігації та передачі даних. Одним із нових напрямів розвитку є використання оптоволоконного каналу керування, який забезпечує передачу команд і телеметричної інформації через фізичний кабель, з'єднаний між оператором та БПЛА. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити стійкість безпілотної системи до дії засобів радіоелектронної боротьби та ускладнює її виявлення традиційними методами.

Принцип роботи БПЛА з оптоволоконним каналом керування полягає у передачі команд через тонкий волоконно-оптичний кабель, який розмотується з котушки під час польоту апарата.

Завдяки цьому забезпечується:

- висока стійкість до радіоперешкод;
- захищеність каналу зв'язку від перехоплення;
- мінімальна затримка передачі сигналу;
- висока точність керування в складних умовах.

Разом із перевагами існують і обмеження, зокрема обмежена дальність польоту, ризик механічного пошкодження кабелю та зниження маневреності через фізичний зв'язок із пунктом керування.

Використання БПЛА з оптоволоконним каналом керування створює низку нових викликів для систем безпеки. Найбільш суттєвими з них є:

- неможливість ефективного придушення стандартними засобами радіоелектронної боротьби;
- зниження ефективності традиційних антидронових комплексів;

- складність раннього виявлення;
- можливість прихованого застосування на малих висотах;
- висока точність ураження цілей.

Практика сучасних бойових дій, зокрема досвід України, демонструє зростання використання таких систем для тактичної розвідки, доставки боєприпасів та виконання ударних завдань.

Ефективна боротьба з такими БПЛА починається з їх своєчасного виявлення. Основними методами (рис. 1) якого є:

- оптичне виявлення: застосування денних камер високої роздільної здатності дозволяє виявляти БПЛА на невеликих та середніх дистанціях;
- тепловізійний контроль: тепловізійні системи забезпечують виявлення БПЛА вночі та за умов обмеженої видимості;
- акустичне виявлення: аналіз характерного шуму електродвигунів та пропелерів дає змогу ідентифікувати БПЛА навіть за відсутності прямої видимості;
- інтелектуальні системи розпізнавання: перспективним напрямом є використання штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання для автоматичного виявлення і класифікації повітряних цілей.



Рисунок 1 – Методи боротьби з безпілотними літальними апаратами, що використовують оптоволоконний канал керування

Оскільки засоби радіопридушення для даного типу БПЛА є малоефективними, тому основними методами боротьби з ними (рис. 2) є:

- фізичне враження стрілецькою зброєю, зенітними установками, автоматизованими турелями та лазерними системами, що є найбільш перспективними через високу швидкість реагування та низьку вартість ураження;
- пошкодження оптоволоконного кабелю: механічне перерізання, створення загороджувальних конструкцій та використання спеціальних перехоплювальних систем;
- використання дронів-перехоплювачів є перспективним напрямом є створення спеціалізованих безпілотників, що здатні: переслідувати ціль, пошкоджувати кабель та застосовувати сітки або механічні захвати;
- інженерні методи захисту: антидронові сітки, укриття, захисні куполи та маскування інфраструктури. Такі рішення особливо ефективні для захисту стаціонарних військових позицій.

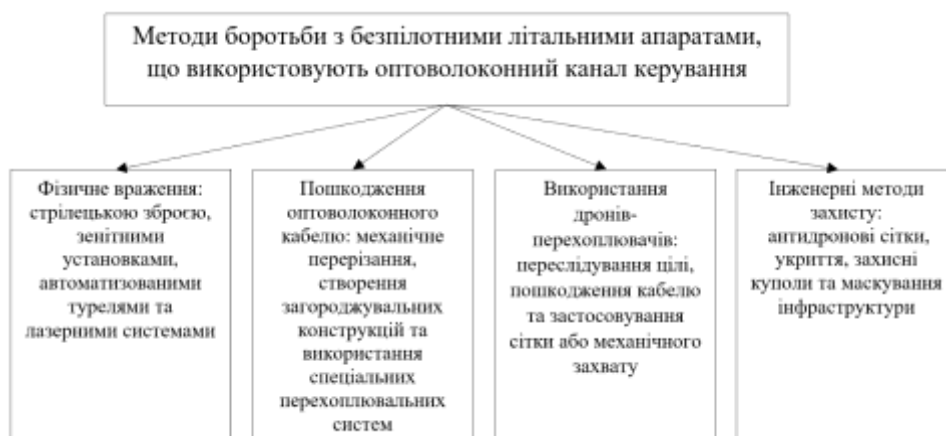


Рисунок 2 – Методи боротьби з безпілотними літальними апаратами, що використовують оптоволоконний канал керування

Подальший розвиток технологій боротьби з БПЛА з оптоволоконним каналом керування (рис. 3) пов'язаний із:

- створенням багаторівневих систем виявлення;
- інтеграцією машинного навчання у системи управління;
- застосуванням роботизованих комплексів;
- автоматизацією процесів прийняття рішень у режимі реального часу.



Рисунок 3 – Технології боротьби з безпілотними літальними апаратами, що використовують оптоволоконний канал керування

Найбільш ефективним підходом є побудова комплексної системи протидії, яка поєднує засоби раннього виявлення, автоматичного супроводу та швидкого фізичного знищення цілі.

Отже, боротьба з БПЛА з оптоволоконним каналом керування потребує перегляду традиційних підходів до антидронових захисту та впровадження нових технічних рішень, адаптованих до сучасних умов ведення бойових дій.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що БПЛА з оптоволоконним каналом керування є новим етапом розвитку безпілотних технологій, який суттєво змінює підходи до організації протидії безпілотним загрозам. Основною перевагою таких систем є висока стійкість до впливу засобів радіоелектронної боротьби, що значно ускладнює їх нейтралізацію традиційними методами, що орієнтовані на радіочастотне придушення.

У ході аналізу встановлено, що ефективна боротьба із БПЛА з оптоволоконним каналом керування потребує застосування комплексного багаторівневого підходу, який включає поєднання сучасних засобів виявлення, фізичного знищення, механічного пошкодження оптоволоконного каналу та інженерних методів захисту. Найбільш перспективними напрямками є використання автоматизованих систем виявлення, дронів-перехоплювачів, а також впровадження систем на основі штучного інтелекту для підвищення швидкості реагування та точності ідентифікації загроз.

Дане дослідження показало, що жоден окремий метод не забезпечує повного захисту від БПЛА даного типу, тому найбільш ефективним рішенням є інтеграція різних технічних засобів у єдину систему протидії, що здатна функціонувати в режимі реального часу та адаптуватися до змін тактичної обстановки.

Перспективи подальших досліджень будуть спрямовані на розроблення нових спеціалізованих антидронових систем захисту, удосконалення алгоритмів автоматичного розпізнавання цілей, а також створення мобільних комплексів протидії, що адаптовані до умов сучасних бойових дій і захисту об'єктів критичної інфраструктури, а також розробку нових конструкцій дронів-перехоплювачів та спеціальних технічних пристроїв для FPV-дронів для фізичного пошкодження БПЛА, що використовують оптоволоконний канал керування.

Інформаційні джерела

1. Wang J., Liu Y., Song H. Counter-Unmanned Aircraft Systems (C-UAS): State of the Art, Challenges, and Future Trends // arXiv. 2020. URL: https://arxiv.org/abs/2008.12461?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 14.05.2026). DOI: [10.1109/MAES.2020.3015537](https://doi.org/10.1109/MAES.2020.3015537)

2. Pham Minh Thang, Nguyen Van Hieu. Research on Fiber-Optic Communication Systems for Unmanned Aerial Vehicles // Journal of Military Science and Technology. 2024. URL:

https://jmst.mod.gov.vn/index.php/jmst/article/view/1908?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 14.05.2026). DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.208.2025.167-170>

3. Suleimenov B., Akhmetov D., Omarov B. Secure Fiber-Optic Communication Architecture for Cooperative UAV Systems // International Journal of Information Technology. 2025. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s41870-025-02719-2?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 14.05.2026). DOI: <https://doi.org/10.1007/s41870-025-02719-2>

4. Tytarenko O., Melnyk V., Horbachov M. Counteracting Fiber-Optic FPV Drones in Modern Warfare: Challenges and Solutions // Advanced Military Technology. 2025. URL: https://aimt.cz/index.php/aimt/article/view/1998?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 14.05.2026). DOI: <https://doi.org/10.3849/aimt.01998>

5. Klushyn D. Combined Control of Unmanned Aerial Vehicles under Active Electronic Warfare Conditions // Computer Systems and Networks. 2025. Vol. 7, No. 2. URL: https://science.lpnu.ua/csn/all-volumes-and-issues/volume-7-number-2-2025/combined-control-unmanned-aerial-vehicles-under?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 14.05.2026). DOI: <https://doi.org/10.23939/csn2025.02.084>

6. Analysis of Laser Weapon Effectiveness against UAV Composite Materials // DOAJ. 2024. URL: https://doaj.org/article/85c8bba9dc72487a96fdea836cbd4606?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 14.05.2026). DOI: <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2024-15-1-195-215>

UDC 623.746.1:623.64:621.391.31

Решетило О. М.

METHODS OF COMBATING UNMANNED AERIAL VEHICLES USING FIBER OPTIC CONTROL CHANNEL

The article considers modern methods of combating unmanned aerial vehicles using a fiber-optic control channel. The principles of their operation, technical features, advantages and disadvantages compared to radio-controlled unmanned aerial vehicles are analyzed. The main threats posed by these unmanned aerial vehicles to military and civilian facilities are identified. Countermeasure methods are systematized, including: physical destruction, mechanical damage to the communication channel, the use of interceptor drones and engineering protection. Special attention is paid to the prospects for the use of Artificial Intelligence and automated detection systems.

Keywords: *unmanned aerial vehicle; fiber optic control channel; anti-drone technologies; countering UAVs; electronic warfare; protection of facilities.*

Дата першого надходження
статті до видання
24.04.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
15.05.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.

УДК: 681.5:004.738.5:664.8.047.8.002.5

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-9

Смолій О. В., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3295-0162>

Микитишин А. Г., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2999-3232>

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ІОТ-МОНІТОРИНГ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СНЕКІВ НА ДВОШНЕКОВОМУ ЕКСТРУДЕРІ

У статті представлено поглиблене дослідження архітектури Інтернету речей (IoT), розробленої для високоточного та багаторівневого моніторингу процесу екструзії снєків на двошнековому екструдері. Запропонована система охоплює повний життєвий цикл даних: збирання технологічних сигналів із датчиків та інверторів, їх попередню обробку і нормалізацію за допомогою програмованого логічного контролера (PLC), передавання в режимі реального часу за протоколом MQTT, а також структуроване довготривале зберігання у системі керування базами даних (СКБД). Такий підхід забезпечує надійність даних і створює основу для оперативної візуалізації та розробки аналітичних інструментів для оптимізації процесу.

Визначено комплекс ключових технологічних індикаторів, що характеризують поведінку системи. До них належать температурні профілі по зонах, динаміка тиску в області формувальної матриці, струм та частота обертання приводних двигунів, точне дозування сировини та сумарне енергоспоживання установки. Безперервний моніторинг цих параметрів формує основу для стабілізації процесу, раннього виявлення відхилень і підвищення відтворюваності властивостей готового продукту. Систематичний аналіз публікацій та промислових кейсів останніх трьох років підтверджує поширення технологій Індустрії 4.0 у харчовому виробництві. Зокрема, застосування легких MQTT-орієнтованих каналів обміну даними, впровадження предиктивного обслуговування електроприводів та перші етапи реалізації концепції Process Analytical Technology (PAT) створюють передумови для побудови цифрового двійника екструзійної лінії.

На основі проведеного дослідження сформульовано рекомендації щодо побудови математичної моделі процесу, визначення економічно обґрунтованого, але інформативного набору датчиків та проектування оптимальної структури даних для довготривалої експлуатації в промислових умовах. Запропоновано покрокову дорожню карту, яка спрямовує підприємство від базового моніторингу до впровадження предиктивної аналітики, алгоритмів виявлення аномалій і, зрештою, розгортання повноцінного цифрового двійника. Аналіз літератури засвідчує наявність помітного дефіциту практичних, орієнтованих на дані досліджень, що стосуються оптимізації та моніторингу двошнекових екструзійних систем у виробництві снєків. Це підкреслює оригінальність, практичну значущість і науковий потенціал представленої роботи у контексті цифрової трансформації харчової промисловості.

Ключові слова: IoT, екструзія, MQTT, Node-RED, SQL, Індустрія 4.0.

Постановка проблеми. Екструзія є базовою технологією виробництва зернових снєків. Двошнекові екструдери забезпечують кращий контроль змішування, тепло-масообміну та структурування білків/крохмалю, що визначає текстуру та показники якості. Сучасні підходи Індустрія 4.0/5.0 для харчових виробництв (смарт-сенсори, аналітика, цифрові двійники) декларують підвищення якості, прогнозованість та стабільність процесів. Однак предметних кейсів для харчової екструзії все ще небагато, в порівнянні, наприклад, із виробництвом полімерів. Останні огляди підтверджують тренд на інтеграцію IoT-моніторингу та аналітики в харчовій переробці, але підкреслюють необхідність практичних реалізацій і стандартизованих моделей даних [1]. Мета дослідження. Сформувати відтворювану IoT-архітектуру моніторингу двошнекової екструзії снєків, визначити мінімальний набір індикаторів якості процесу та запропонувати підхід до аналітики (статистичне контрольоване управління процесом, виявлення аномалій, прогнози), спираючись на досягнення останніх років.

Мета дослідження. Сформувати відтворювану IoT-архітектуру моніторингу двошнекової екструзії снєків, визначити мінімальний набір індикаторів якості процесу та запропонувати підхід до аналітики (статистичне контрольоване управління процесом, виявлення аномалій, прогнози), спираючись на досягнення останніх років.

Аналіз останніх джерел. Сучасні підходи до цифровізації екструзійних процесів активно розвиваються у межах концепцій Індустрії 4.0 та 5.0. У роботі [1] проведено комплексний аналіз тенденцій розвитку харчової переробки, відповідно до парадигми Індустрії 4.0, де підкреслено важливість застосування інтелектуальних давачів, MQTT-обміну даних та систем аналітики даних. Проте автори відзначають, що конкретні галузеві реалізації у сфері харчової екструзії все ще залишаються поодинокими.

Детальніше проблеми моніторингу екструзійних процесів розглянуто в дослідженнях [2], де запропоновано систему акустичної емісії для контролю процесу пластифікації полімерних гранул у двошнековому екструдері. Незважаючи на те, що робота присвячена полімерній екструзії, принципи застосування акустичних методів можуть бути адаптовані й для аналізу процесів у харчових екструдерах.

У роботі [3] розглянуто використання методів машинного навчання для моніторингу деградації полімерів під час екструзії. Автори застосували моделі машинного навчання (ML-моделі) для аналізу температури, тиску та спектральних показників, що дозволяє прогнозувати властивості матеріалу в реальному часі. Використання такої моделі дозволяє виявляти закономірності, робити прогнози або приймати рішення без прямого програмування правил. Подібні підходи можна перенести на харчову екструзію для побудови моделей якості.

У роботі [4] представлено впровадження Raman-спектроскопії (аналітичний метод, який ґрунтується на вимірюванні розсіювання світла) безпосередньо в корпусі екструдера, коли лазерне випромінювання взаємодіє з молекулами речовин. Хоча приклади здебільшого належать до фармацевтичної галузі, підхід може бути використаний у рамках PAT - систем.

Інший напрям представлено у роботі [5], де за допомогою CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics) оцінювалась технологічність полімерів при двошнековій екструзії. CFD-моделювання це метод чисельного моделювання руху рідин, газів і теплопередачі на основі рівнянь механіки суцільного середовища (передусім рівнянь Нав'є-Стокса). Аналогічні чисельні підходи можуть бути використані для побудови цифрових двійників харчових екструдерів.

В статті [6] розглянуто проблеми змішування в коекструдерах, які показали вплив геометрії гвинтів на дисперсійне та дистрибутивне змішування. Для харчових систем це може бути корисним для контролю рівномірності зволоження та однорідності продукту загалом.

У дослідженні [7] розроблено нові методи вимірювання розподілу часу перебування (Residence Time Distribution) у двошнекових екструдерах, що дозволяє оцінювати стабільність процесу.

Важливий практичний приклад промислової IoT-архітектури наведено в офіційній документації Node-RED [8], де описано реалізацію потоку MQTT - Node-RED - MariaDB. Node-RED використано як основну платформу для збирання, обробки та візуалізації даних у реальному часі. Такий підхід підтверджує доцільність застосування low-code середовища Node-RED як центральної ланки системи моніторингу процесів екструзії снєків.

У 2024–2025 рр. активно досліджено можливості впровадження цифрових двійників у харчовій індустрії [9]. Автори зазначають, що застосування цифрових копій технологічних ліній дозволяє скорочувати час оптимізації параметрів.

У харчовій тематиці найбільш релевантним до нашої теми є огляд [10], де досліджено вплив температури, вологості та швидкості обертання шнеків на показники розширення і текстуру снєків.

Таким чином, аналіз літератури свідчить, що значний прогрес досягнуто у полімерній та фармацевтичній екструзії, проте у харчовій галузі такі рішення перебувають на етапах впровадження. Розробка IoT-системи моніторингу двошнекової екструзії снєків із подальшою інтеграцією в цифровий двійник є актуальним напрямом досліджень.

Виклад основного матеріалу. В межах роботи було реалізовано два незалежні підходи моніторингу даних. В першому випадку дані отримуються безпосередньо від давачів або частотних перетворювачів (інверторів). В другому - первинні дані збираються та обробляються програмованим логічним контролером, і в подальшому, через комунікаційний шлюз передаються на сервер.

1. Система А - моніторинг екструдера без використання промислового контролера. Структура наведена на рисунку 1.

Призначення: забезпечення збору та відображення ключових технологічних параметрів.

Архітектура потоку даних: MQTT → Node-RED → MariaDB.

Джерела даних: Польові давачі (сенсори) температури зон, тиску перед матрицею, електричні параметри приводу (струм, напруга, потужність, швидкість частота). Сигнали надходять через наявні комунікаційні інтерфейси та перетворювачі сигналів (послідовні інтерфейси або шлюз у форматі MQTT).

Функції Node-RED:

- нормалізація повідомлень, масштабування та валідація даних;
- агрегації даних (зведення, усереднення) з інтервалом 1–5 хв, запис у MariaDB;
- формування подій та попереджень: контроль телеметрії (watchdog) та відстеження перевищення порогових значень (тиск P, температура T, струм I)

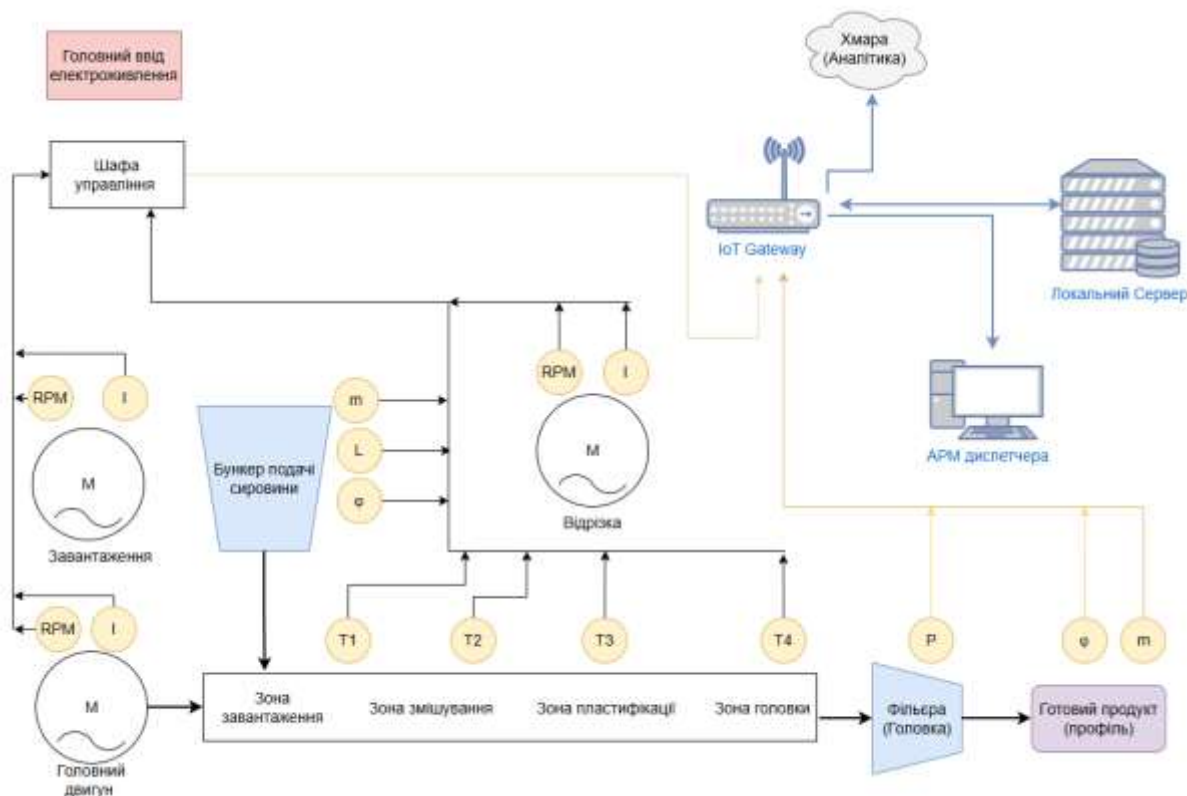


Рисунок 1 – Архітектура Система А

2. Система В — моніторинг з підключенням до системи керування на базі промислового контролера Delta DVP. Структура наведена на рис. 2.

Призначення: Інтегрований моніторинг технологічного процесу, що використовує ПЛК Delta DVP як первинне джерело узгоджених параметрів процесу та станів обладнання.

Архітектура потоку даних: PLC – HMI – Gate - MQTT - Node-RED - MariaDB.

Джерела даних: Дані від давачів поступають в відповідні регістри ПЛК звідки зчитуються панеллю оператора (HMI) і через шлюз передаються на MQTT сервер. Параметрами що контролюються є температури зон, тиск, стани аварій, частота приводу, оцінка крутного моменту за струмом або біти/слово стану (status word), а також окремі канали від частотного перетворювача (VFD). Обмін з ПЛК здійснюється через існуючий польовий протокол Modbus.

Функції Node-RED: Отримання даних від MQTT сервера, парсинг (аналіз) регістрів та уніфікація імен тегів, контроль цілісності та повноти даних (наприклад, watchdog за адресами регістрів, запобігання "затримці кадру"), збереження в MariaDB (первинні дані та агреговані значення), формування аналітичних звітів та операторських панелей (дашбордів).

Було спроектовано та зібрано електричну шафу керування екструдером, яка забезпечує живлення, захист і підключення виконавчих механізмів, частотних перетворювачів (інверторів), контролера Delta DVP, модулів введення-виведення (I/O) та інтерфейсних адаптерів. Система живиться від трифазної мережі змінного струму 380 В, 50 Гц. Основний привід екструдера керується частотним перетворювачем Delta C2000, а допоміжні приводи завантаження та транспортування — перетворювачами серії Delta EL.

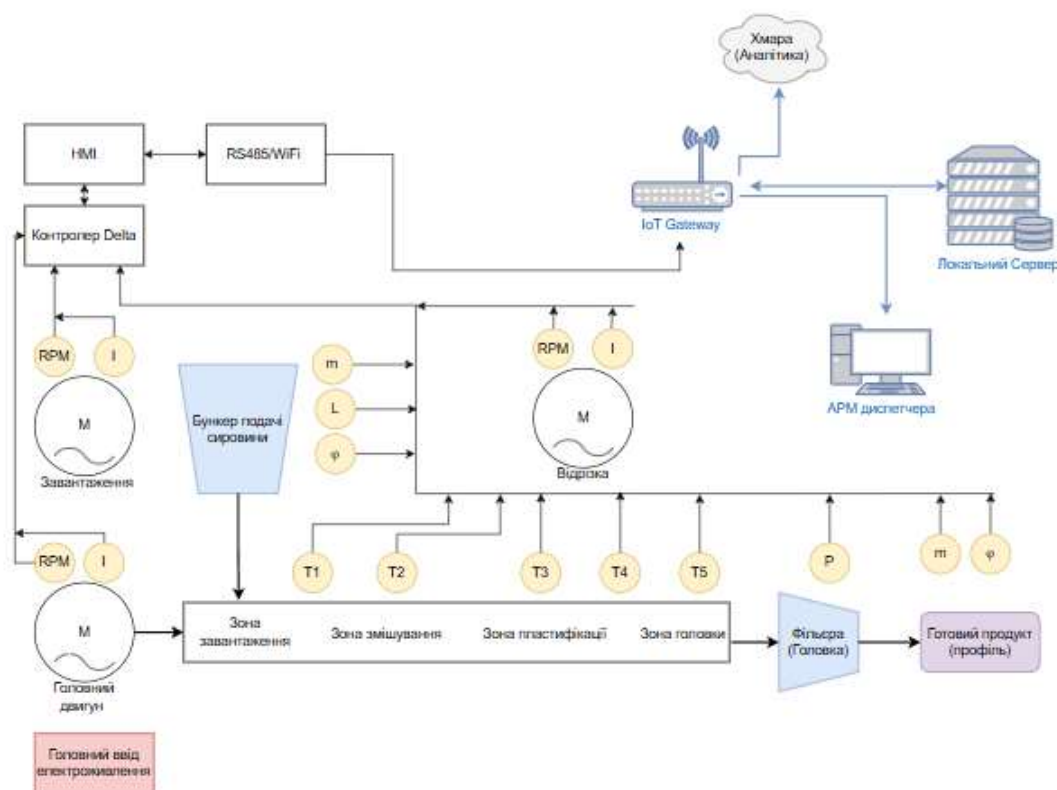


Рисунок 2 – Архітектура Система В (з PLC Delta DVP)

Зв'язок між контролером та частотними перетворювачами (ЧП) здійснюється через шину RS-485 (з використанням протоколу Modbus RTU/ASCII). Для взаємодії з системою IoT-моніторингу застосовано промисловий IoT-шлюз Waveshare ESP32-S3-RS485-CAN, який забезпечує двосторонній обмін даними через RS-485 і передачу даних у мережу Wi-Fi, використовуючи протокол MQTT та брокер Mosquitto. Шлюз виконує роль комунікаційного вузла між нижнім рівнем автоматизації (ПЛК, ЧП) та верхнім рівнем збору та аналізу даних (Node-RED, MariaDB), уніфікуючи телеметрію.

Електрична шафа (рис. 3) містить логічно відокремлені секції: живлення (автоматичні вимикачі, контактори, трансформатори/блоки живлення), секція автоматики (контролер, модулі I/O, інтерфейсні плати), захист (аварійні кнопки, плавкі запобіжники (вставки), індикатори) та комунікації (промислові (RS-485) та комп'ютерні (WiFi) мережі). Конструкція забезпечує безпечну експлуатацію, зручність обслуговування і можливість подальшого розширення. Використано комунікаційні шлюзи для обміну даними з сервером та системою керування вищого рівня.



Рисунок 3 – Електрична шафа керування екструдером з використанням промислового контролера та реалізація шлюза RS485/WiFi

На рисунку 4 показано фрагмент програми агрегації даних реалізований за допомогою Node-RED.

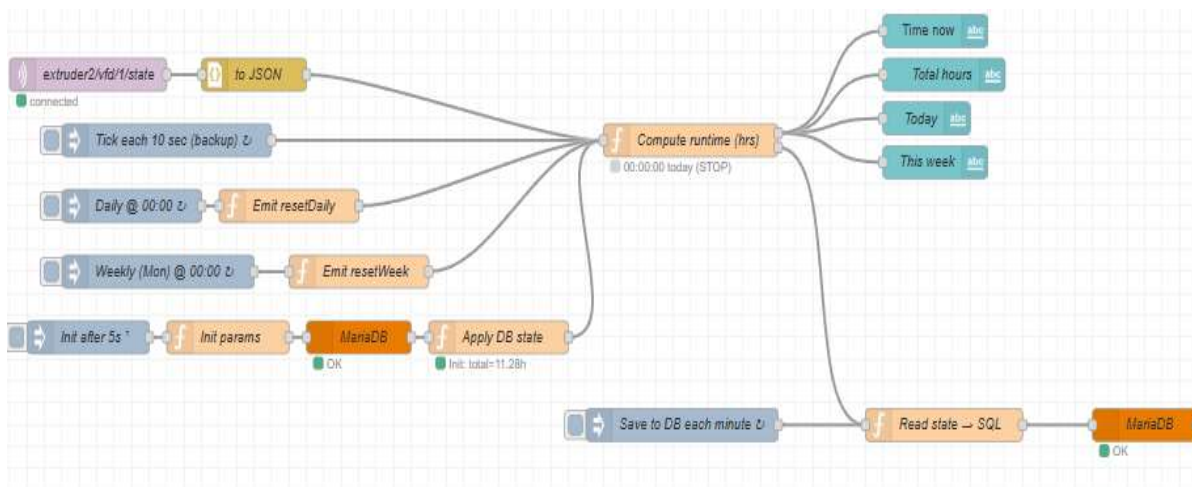


Рисунок 4 – Фрагмент програми агрегації даних реалізований за допомогою Node-RED

Віддалений моніторинг технологічних режимів дозволяє в реальному часі контролювати режими роботи лінії та оперативно їх коригувати. Приклад візуалізації температурних режимів роботи екструдера по секціях у табличному вигляді представлено на рис. 5.

Температура секцій

| Секція | Т задана | Т фактична | Нагрівання | Охолодження |
|----------|----------|------------|------------|-------------|
| Секція 1 | 50.0 °C | 52.90 °C | ● | ● |
| Секція 2 | 90.0 °C | 87.00 °C | ● | ● |
| Секція 3 | 125.0 °C | 126.30 °C | ● | ● |
| Секція 4 | 120.0 °C | 118.80 °C | ● | ● |
| Секція 5 | 80.0 °C | 78.40 °C | ● | ● |
| Секція 6 | 75.0 °C | 85.20 °C | ● | ● |

Рисунок 5 – Візуалізація температури секцій екструдера

Візуалізація даних режимів роботи екструдера здійснюється як у реальному часі, так і у вигляді графіків за обраний період. На основі отриманих даних побудовано графік зміни частоти та струму головного двигуна (рис.6).

3. Структура бази даних (спільна для обох систем)

Єдина база даних (БД), що сформована з використанням системи керування базами даних (СУБД) MariaDB, використовується обома системами для забезпечення стандартизованого зберігання даних. Пропонована структура БД включає такі логічно виокремлені таблиці:

- tags (ідентифікатори параметрів, одиниці виміру, адреси джерел, коефіцієнти масштабування (scaling factors), активність),
- telemetry_raw (первинні дані з датчиків з часовими мітками у мілісекундах і посиланням на tag_id),
- telemetry_agg_5min (агреговані ряди за 5 хвилин із полями avg, min, max, кількість вимірів),
- recipes (рецептурні налаштування, зокрема T_zone1..N, P_set, freq_set),
- alarms (журнал подій і аварій із кодом, рівнем важливості та повідомленням),
- users (облікові записи та ролі доступу).

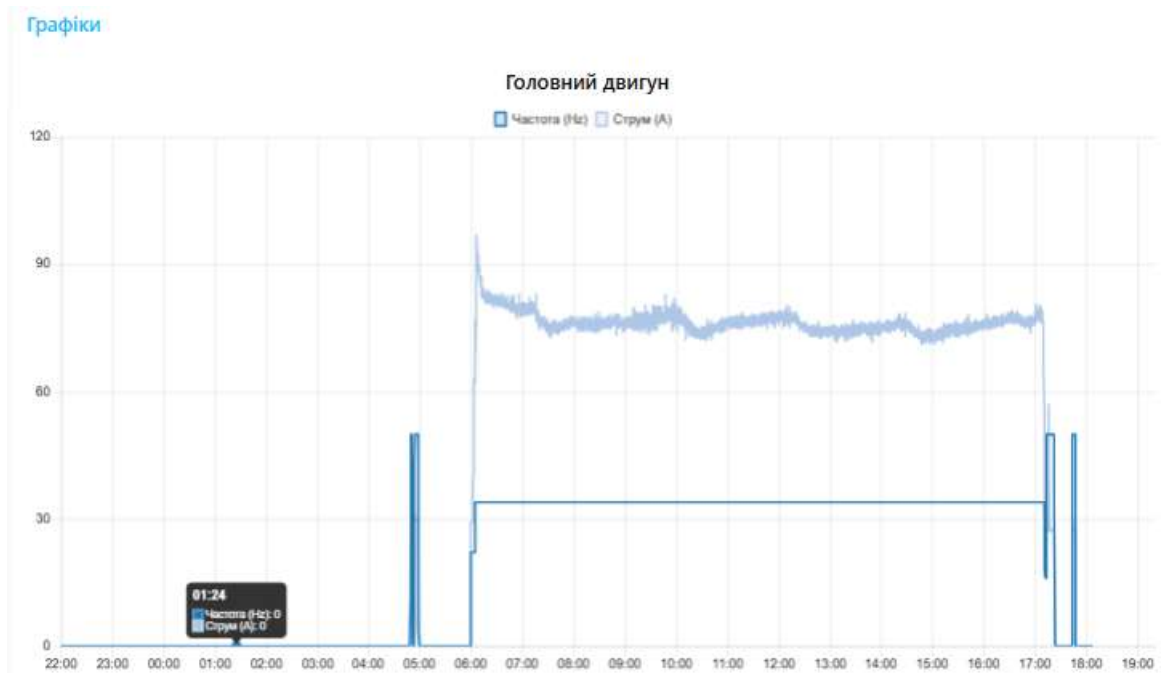


Рисунок 6 – Графік роботи головного двигуна

База даних спільна, що забезпечує порівнянність даних між системами А і В. Запропонована схема таблиць приведена нижче:

- tags (id, name, unit, source_addr, scale, is_active)
- telemetry_raw (id, ts_ms, tag_id, value, quality)
- telemetry_agg_5min (ts_5min, tag_id, avg_val, min_val, max_val, n)
- recipes (id, name, T_zone1..N, P_set, freq_set)
- alarms (id, ts_ms, code, severity, message, message, src_tag_id)
- users (id, login, role, email)

Така структура розроблена для забезпечення масштабованості та гнучкості розширення бази даних відповідно до подальших дослідницьких завдань (рис. 7).

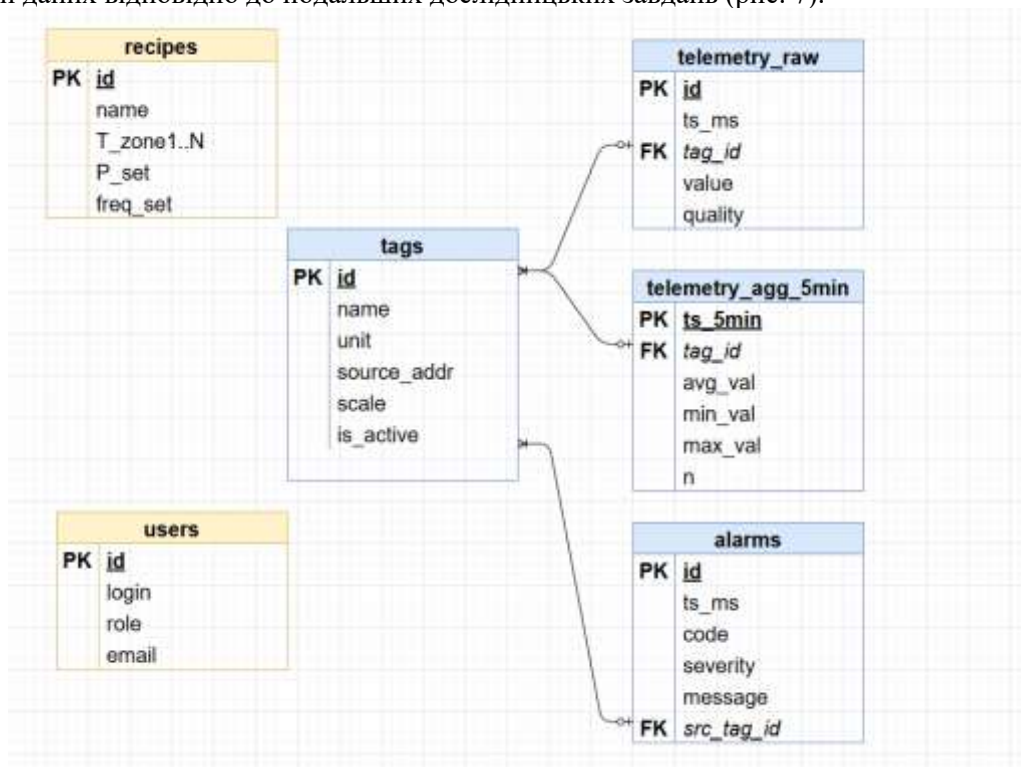


Рисунок 7 – Структура бази даних IoT-моніторингу

4. Порівняльний аналіз реалізацій

Система А (прямий моніторинг) та Система В (моніторинг через ПЛК) являють собою дві принципово різні стратегії IoT-інтеграції.

Система А є рішенням з меншими капітальними витратами (CAPEX) та нижчою складністю інтеграції, оскільки вона збирає дані безпосередньо від польових давачів та частотних перетворювачів через IoT-шлюз. Такий підхід ідеально підходить для швидкого пілотного впровадження або для ліній, які не мають централізованого керуючого ПЛК. Однак, її основним недоліком є нижча стабільність і залежність якості даних від надійності комунікаційного каналу (шлюзу). Крім того, аварійність тут реєструється лише за пороговими значеннями (P, T, I), що обмежує можливості детальної діагностики.

На противагу, Система В використовує програмований логічний контролер Delta DVP як єдине джерело даних. Це суттєво підвищує стабільність телеметрії та знімає навантаження з IoT-шлюзу. Хоча капітальні витрати (CAPEX) та складність інтеграції є середніми (через необхідність конфігурації ПЛК та забезпечення доступу до його регістрів), переваги полягають у більшому наборі подій та аварій. ПЛК надає не лише порогові спрацювання, але й коди станів та сигнали несправностей обладнання, що є критично важливим для реалізації предиктивної аналітики та цифрового двійника. Обидві системи забезпечують агрегацію даних з інтервалом 1–5 хв для подальшого аналізу.

Зрештою, Система В більш перспективна для довгострокового впровадження та побудови складних моделей якості, оскільки забезпечує вищу надійність, консистентність даних та деталізований контроль подій, що є необхідною передумовою для переходу від простого моніторингу до предиктивної аналітики.

Порівняльний аналіз реалізованих систем приведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз реалізацій Систем А і В

| Критерій | Система А (ручне керування) | Система В (PLC Delta DVP) | Коментар |
|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Джерело даних | Польові сенсори / шлюз MQTT | PLC (регістри) | У В - єдине «джерело даних» від PLC |
| Затримка / стабільність | Залежить від шлюзу/каналу | Стабільна з боку PLC-опитування | Обидві підтримують 1–5 хв агрегати |
| Аварійність (події) | Пороги за величинами | Події/стани з PLC + пороги | В має багатший набір подій |
| Складність інтеграції | Низька/середня | Середня | В потребує доступу до PLC |
| Супровід (OPEX) | Низький | Низький/середній | Залежить від частоти змін у PLC |
| Капітальні витрати (CAPEX) | Низькі (мін. сенсори/шлюз) | Середні (PLC-доступ, налаштування) | Обидві альтернативи прийнятні |

Примітка: обидві системи використовують однаковий стек обробки даних: MQTT → Node-RED → MariaDB.

5. Інтеграція та верифікація

В обох реалізованих системах (А і В) застосовано механізми контролю якості даних, що включають контроль активності з'єднання (watchdog за адресами/топіками MQTT) та перевірку діапазонів допустимих значень, а також синхронізацію часових міток. Ключовим елементом інтеграції є уніфікація та стандартизація імен тегів за допомогою таблиці tags. Для фіксації та відстеження нештатних подій введено журнали аварій та подій. Всі ключові показники агреговані у п'ятихвилинні часові інтервали для подальшого аналізу.

Висновки. Було успішно реалізовано два варіанти системи IoT-моніторингу екструзії снєків: з прямим підключенням до давачів (Система А) і інтегровану через програмований логічний контролер Delta DVP (Система В). Обидва варіанти продемонстрували стабільність у виробничих умовах, забезпечуючи надійний збір, збереження та візуалізацію ключових параметрів процесу. Обрана IoT-архітектура MQTT → Node-RED → MariaDB підтвердила свою ефективність і масштабованість для задач моніторингу та подальшої аналітики.

Надані таблиці та графіки моніторингу (див. рис. 3, 6) відображають динаміку температур зон, частоти обертання і струму головного приводу у реальному часі. Рисунок 3 та 6 слугують візуальним підтвердженням працездатності та практичної корисності впровадженого підходу.

Цей проект реалізовано в рамках розробки дорожньої карти з впровадження Індустрії 4.0 для керування екструдером для виробництва снєків.

Інформаційні джерела

1. Hassoun A. Food processing 4.0: Current and future developments spurred by the fourth industrial revolution / A. Hassoun, S. Jagtap, H. Trollman, G. Garcia-Garcia, Abdullah N., G. Goksen, G. Bader, F. Ozogul, F. Barba, J. Cropotova, P. Munekata, J. Lorenzo // Food control. 2023. Vol. 145. Article 109507. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109507>.
2. Kida T. Real-time monitoring of pellet plastication in a full-flight screw and kneading disk elements of a co-rotating self-wiping twin-screw extruder by acoustic emission (AE) sensing / T. Kida, M. Ohara, S. Nagasawa // Polymers. 2023. Vol. 15, no. 5. Article 1140. <https://doi.org/10.3390/polym15051140>.
3. Munir N. Interpretable machine learning methods for monitoring polymer degradation in extrusion of polylactic acid / R. McMorrow, K. Mulrennan, D. Whitaker, S. McLoone, M. Kellomäki, E. Talvitie, I. Lyyra, M. McAfee, // Polymers. 2023. Vol. 15, no. 17. Article 3566. <https://doi.org/10.3390/polym15173566>.
4. Thermo Fisher Scientific. How In-Line Monitoring with Raman Spectroscopy Can Make a Difference in Polymer Extrusion Processes [Електронний ресурс]. URL: <https://www.thermofisher.com/blog/materials/how-in-line-monitoring-with-raman-spectroscopy-can-make-a-difference-in-polymer-extrusion-processes/> (дата звернення: 31.10.2025).
5. Marquez J. Predicting the processability of polymers in a twin-screw extruder / J. Marquez, Y. Quan, X. Zhu, H. Sue, Q. Wang // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2024. Vol. 63, no. 22. Article 9823–9832. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c01039>.
6. Oldemeier J. Analysis of the dispersive and distributive mixing effect of screw elements on the co-rotating twin-screw extruder with particle tracking / J. Oldemeier, V. Schöppner // Polymers. – 2024. Vol. 16, no. 21. Article 2952. <https://doi.org/10.3390/polym16212952>.
7. Yu H. Residence time distribution in an asymmetrical twin-screw extruder / H. Yu, Z. Zhao, B. Xu, G. Hu, C. Lemaitre, Y. Feng // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2023. – Vol. 62, no. 43. Article 17997–18008. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c02065>.
8. Node-RED documentation [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://nodered.org/docs/> (дата звернення: 31.10.2025).
9. Abdurrahman E. E. M. Digital twin applications in the food industry: a review / E. E. M. Abdurrahman, G. Ferrari // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2025. Vol. 9. Article 1538375. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1538375>.
10. Ali I. M. Effects of extrusion process conditions on nutritional, anti-nutritional, physical, functional, and sensory properties of extruded snack: a review / I. M. Ali, S. F. Forsido, C. G. Kuyu, E. H. Ahmed, K. N. Andersa, K. T. Chane, T.K. Regasa // Food Science & Nutrition. 2024. Vol. 12, no. 11. Article 8755–8761. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4472>.

Smolii O., Mykytyshyn A.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

IOT MONITORING OF THE EXTRUSION PROCESS DURING SNACK PRODUCTION ON A TWIN SCREW EXTRUDER

The article presents an in-depth investigation of an Internet of Things (IoT) architecture designed to enable advanced, high-resolution monitoring of the snack extrusion process on a twin-screw extruder. The proposed solution integrates the complete data lifecycle: the acquisition of process signals from sensors and inverters, preprocessing and normalization by a Programmable Logic Controller (PLC), real-time transmission through the MQTT protocol, and structured long-term storage in a Database Management System (DBMS). This approach ensures reliable data continuity and supports both operational visualization and the development of advanced analytical tools for process optimization and quality assurance.

A comprehensive set of key technological indicators has been defined, reflecting the critical behavior of the extrusion system. These include multi-zone temperature profiles, pressure dynamics in the die zone, motor current and rotational frequency, precise dosing of raw materials, and cumulative

energy consumption. Continuous monitoring of these parameters provides the foundation for stabilizing the process, detecting anomalies at an early stage, and improving reproducibility of product characteristics. A systematic review of scientific literature and industrial case studies published in the last three years confirms the increasing adoption of Industry 4.0 technologies within food manufacturing. Notably, the integration of lightweight MQTT-based data pipelines, the deployment of predictive maintenance strategies for electric drive systems, and the initial stages of Process Analytical Technology (PAT) implementation create the prerequisites for building a Digital Twin of the extrusion line.

Based on the conducted research, the article formulates detailed recommendations for constructing a mathematical process model, defining an economically justified but sufficiently informative sensor set, and designing an optimal data structure capable of supporting long-term industrial operation. A step-by-step roadmap is proposed, guiding enterprises from fundamental monitoring tasks toward the implementation of predictive analytics, anomaly detection algorithms, and eventually, the deployment of a full-scale Digital Twin. The literature review highlights a noticeable gap in practical, data-driven studies focused specifically on the optimization and monitoring of twin-screw snack extrusion systems. This gap underscores both the originality and the practical relevance of the presented work, as well as its potential to contribute to further research in data-centric food process control and digital transformation.

Keywords: *IoT; extrusion; MQTT; Node-RED; SQL; Industry 4.0.*

Дата першого надходження
статті до видання
17.03.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
28.04.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.

УДК 621.865.8

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-10

Смолянкін О. О., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9312-9820>Чорнобай М. О., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-4648-1774>Маркіна Л. М., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0735-074>Сацик В. О., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7132-3363>

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

РОЗРОБКА АНТРОПОМОРФНОГО МАНІПУЛЯТОРА З КЕРУВАННЯМ ВІД РУКАВИЧКИ З ДАТЧИКАМИ ЗГИНУ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP32

У статті описано розробку і реалізацію системи керування антропоморфним маніпулятором кисті руки, надрукованої на 3D-принтері, за допомогою рукавички з резистивними датчиками згину. Виконавчими механізмами слугують п'ять сервоприводів Tower Pro MG996R, кожен з яких відповідає за рух окремого пальця. Сигнали від датчиків рукавички Flex Sensor 4.5" зчитуються аналогово-цифровим перетворювачем мікроконтролера ESP32 і через функцію `map()` перетворюються на кути повороту сервоприводів. Описано методику калібрування датчиків, особливості апаратної реалізації на основі ділянок напруги з резисторами 22 кОм, а також програмну частину реалізовано на мові C у середовищі Arduino IDE. Наведено електричні схеми підключення, зображення готового прототипу та вихідний код програми. Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що запропонований підхід забезпечує плавне та відтворюване керування маніпулятором у реальному часі.

Ключові слова: антропоморфний маніпулятор, ESP32, датчик згину, сервопривід, Arduino IDE, калібрування датчиків, рукавичка керування, реабілітаційна робототехніка, 3D-друк, вбудовані системи.

Постановка проблеми. Сучасна медична реабілітаційна інженерія та промислова робототехніка стикаються зі спільним викликом: необхідністю створення доступних, надійних і інтуїтивно керованих протезів та маніпуляторів кисті руки. Ампутації кінцівок внаслідок травм або захворювань суттєво знижують якість життя людей, тоді як сучасні комерційні рішення залишаються надзвичайно дорогими і технологічно складними для масового застосування. Однією із причин, яка спричинила загострення цієї проблеми стало повномасштабне вторгнення Росії в Україну з 2022 року. Тисячі військових та цивільних отримали важкі поранення, що призвели до втрати верхніх кінцівок внаслідок вибухів мін, обстрілів і бойових дій загалом. За даними благодійних організацій, кількість ампутацій у країні зросла у кілька разів порівняно з довоєнним рівнем. Крім цього, Україна є однією з найбільш замінованих країн у світі, а розмінування є надзвичайно небезпечною роботою, під час якої військові зазнають тяжких поранень і втрачають кінцівки. Тому розробка доступних та функціональних протезів набуває стратегічного значення: відновлення ветеранів та постраждалих цивільних.

Одночасно з цим в промисловій автоматизації зростає попит на легкі маніпулятори, здатні копіювати рухи людської руки в телеопераційних системах. Ключовою проблемою при проектуванні таких систем є точне і синхронне відтворення рухів пальців у реальному часі із мінімальними затримками.

Доступність на сьогоднішній день мікроконтролерів з потужними АЦП, таких як ESP32, поява гнучких друкарських конструкцій та відносно дешевих датчиків згину відкривають можливість для розробки прототипів на рівні навчальних і дослідницьких проектів в межах університетів. Однак залишаються актуальними питання методики калібрування датчиків для досягнення відтворюваного діапазону вимірювань та алгоритмів перетворення аналогового сигналу в кут повороту сервоприводу.

Аналіз останніх досліджень. Напрямок розробки маніпуляторів кисті руки активно досліджується починаючи з 2000-х років. Класичним прикладом є роботизована рука InMoov [1], повністю побудована з 3D-надрукованих деталей і керована від сервоприводів. Цей проєкт встановив стандарт відкритої апаратної платформи для антропоморфних маніпуляторів.

Значний вплив у розробку рукавичок із датчиками мають роботи Simone та Kamper [2], які запропонували рукавичку для реабілітації з вбудованими тензорезисторами. Sierotowicz та співавтори [3] довели ефективність систем Glove-to-Robot для моторної реабілітації пацієнтів з інсультом.

Застосування платформи Arduino для керування сервоприводами в маніпуляторах описано в роботах Tavakoli та Sgambelluri [4], так із досвіду розробників Луцького національного технічного університету, що описаний у роботі «Автоматизована смарт-рука робота-гуманоїда на платформі Arduino» [8], які зазначають, що 8-бітний АЦП Arduino (1024 рівні) є недостатнім для плавної передачі дрібних рухів пальців. Саме це обґрунтовує перехід на ESP32 з 12-бітним АЦП (4096 рівнів), що описано в даній роботі.

Датчики Flex Sensor 4.5" фірми Spectra Symbol широко використовуються в задачах розпізнавання жестів [5]. Класична схема підключення через дільник напруги з підтягуючим резистором 10–47 кОм добре відома, проте питання точного вибору номіналу підтягуючого резистора та процедури тарування для конкретного діапазону АЦП висвітлено менш детально.

Проблема нестабільності watchdog-таймера на ESP32 при роботі з кількома ШІМ-каналами одночасно описана в технічній документації Espressif [6] і вирішується використанням функції yield() у циклі loop(), що і застосовано в даній роботі.

Метою роботи є розробка і практична реалізація системи повторення рухів пальців людської руки з використанням рукавички з датчиками згину та антропоморфного маніпулятора на базі сервоприводів, що керуються мікроконтролером ESP32.

Для досягнення вказаної мети під час розробки вирішувались наступні задачі:

1. Проектування механічної конструкції маніпулятора кисті з 5 незалежно керованими пальцями;
2. Вибір та обґрунтування мікроконтролера, сервоприводів та датчиків;
3. Розробка схем: електричної принципової та схеми підключення;
4. Проведення калібрування датчиків згину з фіксацією мінімального та максимального значень АЦП;
5. Програмна реалізація системи керування на мові С у середовищі Arduino IDE з усуненням збоїв watchdog-таймера;
6. Верифікація роботи системи та оцінка плавності й точності відтворення рухів.

Виклад основного матеріалу. Як зазначалось раніше, для реалізації поставленої мети було сформовано шість взаємопов'язаних задач, що охоплюють повний цикл розробки – від механічного проектування до експериментальної перевірки системи. Послідовне вирішення кожної з них забезпечує комплексний підхід до створення маніпулятора кисті та дозволяє отримати обґрунтовані результати на кожному етапі роботи.

Отже, спочатку була реалізована конструкція маніпулятора. Механічна частина якого є кистю руки людини в масштабі 1:1, повністю надрукованою на FDM 3D-принтері з використанням матеріалу PLA. Вона включає п'ять пальців з фаланговими шарнірами та систему натяжних ниток (тягових жил), з'єднаних зі шківками сервоприводів Tower Pro MG996R, розміщених у передпліччі. При натягу нитки відбувається згинання відповідного пальця; розгинання – пасивне, за рахунок вбудованих гумових елементів повернення [8]. Загальний вигляд розробленої руки представлено на рисунку 1.

Сервоприводи Tower Pro MG996R обрані через їх характеристики: металевий редуктор, один кульковий підшипник, крутний момент 11 кг·см при напрузі живлення 6 В та кутова стандартних 180°) з метою захисту механіки від перевантажень і уникнення надмірного натягу нитки.

Обґрунтований вибір мікроконтролера, сервоприводів та датчиків визначає як технічні можливості системи, так і практичну доцільність її реалізації. З урахуванням вказаних недоліків плати Arduino, для керування маніпулятором було обрано мікроконтролер ESP32 CH340 Type-C (модуль WROOM-32), який має наступні переваги: тактова частота 240 МГц (проти 16 МГц), 12-бітний АЦП (4096 рівнів проти 1024), вбудований WiFi/Bluetooth для перспективного розширення функціоналу та можливість одночасного формування кількох незалежних ШІМ-сигналів.

П'ять сервоприводів підключено до виходів ШІМ ESP32:

- великий палець: GPIO 18;
- вказівний: GPIO 19;
- середній: GPIO 21;
- безіменний: GPIO 22;
- мізинець: GPIO 23.

П'ять датчиків згину Flex Sensor 4.5" підключено до входів АЦП:

- великий палець: GPIO 32;
- вказівний: GPIO 33;
- середній: GPIO 34;
- безіменний: GPIO 35;
- мізинець: GPIO 36.

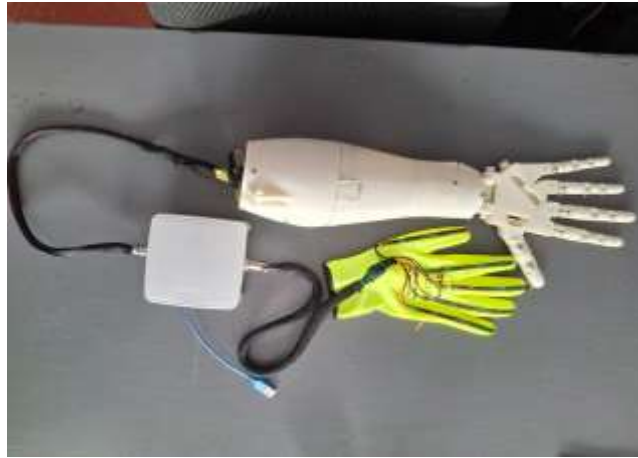


Рисунок 1 – Загальний вигляд розробленої системи: маніпулятор (ліворуч), керуюча рукавичка з датчиками згину (праворуч), блок електроніки ESP32 (центр).

Кожен датчик увімкнено у схему дільника напруги з резистором 22 кОм, підключеним між виходом датчика та землею. При такому включенні вхідна напруга АЦП лінійно залежить від опору датчика, що змінюється у діапазоні 10-22 кОм при згині від 0° до 180°. Живлення логічної частини ESP32 здійснюється через USB Type-C; силова шина сервоприводів підключена до окремого зовнішнього стабілізованого джерела живлення 6 В для запобігання просадкам напруги під час синхронного руху всіх пальців.

Вся електроніка (ESP32, плата дільників напруги, з'єднувальні кабелі) розміщена в готовому промисловому пластиковому корпусі, що забезпечує захист від механічних пошкоджень і надає завершеного вигляду пристрою (рис. 2).



Рисунок 2 – Внутрішній вигляд корпусу з ESP32 та платою дільників напруги

Точно розроблена електрична схема є умовою стабільної та безвідмовної роботи системи, а в нашому випадку руки-маніпулятора в цілому. Електрична принципова схема системи розроблена у середовищі EasyEDA і включає такі компоненти: джерело живлення USB (U2 USB-PWR), мікроконтролер ESP32-CH340C-TYPE-C (U1), п'ять сервоприводів (M1-M5 Motor_Servo), п'ять датчиків згину (U3-U7 Flex Sensor) і п'ять підтягуючих резисторів 22 кОм (R1-R5) та представлено на рисунку 3.

Калібрування датчиків згину є обов'язковим етапом нашої розробки, оскільки кожен датчик Flex Sensor має власний розкид початкового опору та нелінійні характеристики. Метою

калібрування є визначити мінімальне і максимальне значення коду АЦП для кожного пальця в стані повного розгинання і повного згинання.

Методика калібрування полягає в наступному: у налагоджувальний варіант програми виводяться сирі (початкові) значення АЦП через Serial Monitor (115200 бод). Рукавичку надягають і поперемінно фіксують кожен палець у двох крайніх положеннях – повністю випрямлений та максимально зігнутий. Зафіксовані значення АЦП записуються як мінімальний та максимальний рівень для відповідного датчика.

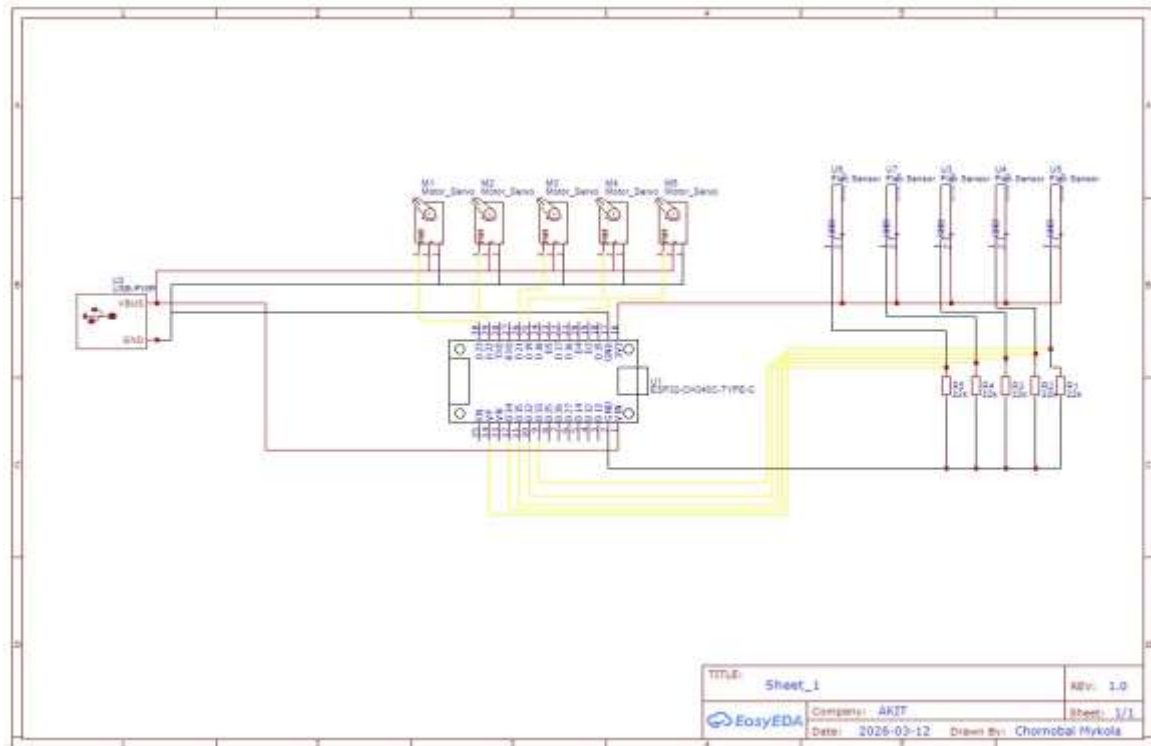


Рисунок 3 – Принципова електрична схема системи керування

За результатами проведеного калібрування було отримано такі діапазони АЦП (мін / макс):

- мізинець: 1000 / 1845;
- великий палець: 1600 / 2611;
- вказівний: 1400 / 2559;
- середній: 1600 / 2302;
- безіменний: 1500 / 2411.

Отримані значення безпосередньо використовуються у функції `constrain()` для обмеження діапазону та у функції `map()` для лінійного перетворення коду АЦП в кут сервоприводу (0-95°).

Програмна реалізація системи керування є головним елементом, що об'єднує апаратну частину в єдиний комплекс. Програма написана мовою C у середовищі Arduino IDE з використанням бібліотеки `ESP32Servo`. Структура програми складається із двох частин: `setup()` і `loop()`.

У функції `setup()` виконується ініціалізація послідовного порту (115200 бод), прив'язка об'єктів `Servo` до відповідних GPIO-виводів та встановлення початкового положення сервоприводів у 0° (пальці розігнуті). Затримка 1000 мс після ініціалізації дозволяє сервоприводам вийти у нульове положення до початку зчитування датчиків.

У функції `loop()` реалізовано наступний алгоритм: зчитування аналогових значень з п'яти каналів АЦП; обмеження значення у каліброваному діапазоні за допомогою `constrain()`; лінійне відображення в діапазон 0-95° за допомогою `map()` з інвертованими аргументами (від максимуму до мінімуму), що забезпечує відповідність: згин пальця рукавички і збільшення кута сервоприводу; виведення кутів на відповідні сервоприводи; мінімальна затримка 1 мс та виклик `yield()` для передачі керування операційній системі FreeRTOS ESP32 і запобігання спрацюванню `watchdog`-таймера.

Ключовою особливістю є використання `yield()` замість `delay()`. На відміну від Arduino, де `loop()` виконується монополюбно, ESP32 на базі FreeRTOS потребує явної передачі керування системним задачам. Без `yield()` або достатнього `delay()` watchdog-таймер через ~5 с примусово перезавантажує мікроконтролер.

Вихідний код програми (мова C, Arduino IDE) представлено на лістингу 1.

Лістинг 1 – Програмна реалізація керування маніпулятором (Arduino IDE / C)

```
#include <ESP32Servo.h>
Servo servoBig;
Servo servoIndex;
Servo servoMiddle;
Servo servoRing;
Servo servoPinky;
const int PIN_BIG=18, PIN_INDEX=19, PIN_MIDDLE=21, PIN_RING=22, PIN_PINKY=23;
const int FLEX_PINKY=36, FLEX_BIG=32, FLEX_INDEX=33, FLEX_MIDDLE=34,
FLEX_RING=35;
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  servoBig.attach(PIN_BIG);
  servoIndex.attach(PIN_INDEX);
  servoMiddle.attach(PIN_MIDDLE);
  servoRing.attach(PIN_RING);
  servoPinky.attach(PIN_PINKY);
  servoBig.write(0);
  servoIndex.write(0);
  servoMiddle.write(0);
  servoRing.write(0);
  servoPinky.write(0);
  delay(1000);
}
void loop() {
  int vP=analogRead(FLEX_PINKY);
  vB=analogRead(FLEX_BIG);
  vI=analogRead(FLEX_INDEX);
  vM=analogRead(FLEX_MIDDLE);
  vR=analogRead(FLEX_RING);
  int posP = map(constrain(vP,1000,1845), 1845,1000, 0,95);
  int posB = map(constrain(vB,1600,2611), 2611,1600, 0,95);
  int posI = map(constrain(vI,1400,2559), 2559,1400, 0,95);
  int posM = map(constrain(vM,1600,2302), 2302,1600, 0,95);
  int posR = map(constrain(vR,1500,2411), 2411,1500, 0,95);
  servoBig.write(posB);
  servoIndex.write(posI);
  servoMiddle.write(posM);
  servoRing.write(posR);
  servoPinky.write(posP);
  delay(1);
  yield();}
```

кінець лістингу 1

Зворотне відображення у `map()` (від максимального до мінімального значення АЦП як першого аргументу) є свідомим дизайнерським рішенням: при фізичному згинанні пальця опір датчика зростає, а значення АЦП збільшується – але ми хочемо, щоб кут сервоприводу також

збільшувався. Інверсія аргументів `map()` вирішує цю задачу без додаткових математичних перетворень.

Висновки. В результаті проведеної роботи реалізовано функціональний прототип системи дистанційного повторення рухів пальців людської руки. Основні результати і висновки по завершенню проведеного дослідження наступні:

1. Запропонована архітектура «рукавичка-ESP32-маніпулятор» забезпечує плавне й інтуїтивне керування кожним пальцем незалежно з затримкою не більше 1-2 мс у циклі опитування.

2. Перехід з платформи Arduino на ESP32 дозволив підвищити роздільну здатність АЦП у 4 рази (з 1024 до 4096 рівнів), що безпосередньо позначилось на плавності руху пальців маніпулятора.

3. Запропонована методика калібрування датчиків згину дозволила індивідуально визначити діапазон АЦП для кожного пальця і застосувати його в функції `map()` без складних алгоритмів.

4. Схема дільника напруги з резисторами по 22 кОм підібрані відповідно до максимального опору датчика Flex Sensor 4.5", дозволила отримати стабільний сигнал без перешкод

5. Виклик функції `yield()` у циклі `loop()` є обов'язковим для ESP32 при безперервному опитуванні АЦП – він запобігає скиданню мікроконтролера watchdog-таймером FreeRTOS.

6. Розроблену систему може бути використано як платформу для подальших досліджень у сфері реабілітаційних протезів для верхніх кінцівок ветеранів, цивільного населення, телеоперування, а також як навчальний стенд у галузі робототехніки та мехатроніки.

Перспективами подальшого розвитку є додавання бездротового з'єднання (Bluetooth/WiFi) для збільшення відстані між рукавичкою і маніпулятором, реалізація зворотного зв'язку за силою захоплення та розширення системи до повноцінного протезу з кріпленням до передпліччя.

Інформаційні джерела

1. Gael Langevin. InMoov – Open Source 3D printed life size robot. URL: <https://inmoov.fr> (дата звернення: 01.03.2026).

2. Simone L. K., Kamper D. G. Design considerations for a wearable monitor to measure finger posture. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2005. Vol. 2, No. 5. P. 1-10.

3. Sierotowicz M., Lotti N., Carpaneto L., Molteni F., Guanziroli E., Muller-Putz G. et al. EMG-Driven Machine Learning-Based Control of Finger Stiffness. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2019. Vol. 27, No. 5. P. 1038-1046.

4. Tavakoli M., Sgambelluri N., Niccolini M., Mazzoleni S., Filippeschi A., Vitiello N. Adaptive gesture recognition with variation estimation for robotic hand prostheses. *Robotics and Autonomous Systems*. 2017. Vol. 95. P. 52-64.

5. Spectra Symbol. Flex Sensor 4.5 inch – Datasheet URL: <https://www.Spectrasymbol.com/flex-sensor> (дата звернення: 01.03.2026).

6. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. Ver. 5.3. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (дата звернення: 01.03.2026).

7. УНІАН. З початку широкомасштабної війни від 20 до 50 тисяч українців пережили ампутацію – WSJ. URL: <https://www.unian.ua/war/viyna-v-ukrajini-vid-20-do-50-tisyach-ukrajinciv-perezihili-amputaciyu-wsj-12348438.html> (дата звернення: 10.03.2026).

8. Oleksandr Povstanoi, Lyudmila Markina, Viktor Denysiuk, Yurii Lapchenko, Viktor Satsyk, Mykhailo Pylypets. Automated smart humanoid robot arm on the ARDUINO platform / *Technologia i Automatyzacja Montażu*. V. 130, Issue 4 (2025), Pages 43-53. URL: <https://doi.org/10.7862/tiam.2025.4.4>

УДК 621.865.8

Smoliankin O. , Markina L. , Chornobai M. , Satsyk V.

Lutsk National Technical University

DEVELOPMENT OF AN ANTHROPOMORPHIC MANIPULATOR CONTROLLED BY A GLOVE WITH FLEX SENSORS BASED ON THE ESP32 MICROCONTROLLER.

The article describes the development and implementation of a control system for a 3D-printed anthropomorphic hand manipulator, controlled via a glove equipped with resistive flex sensors. The actuators are five Tower Pro MG996R servo motors, each responsible for the independent movement of an individual finger. Signals from the Flex Sensor 4.5" glove sensors are acquired by the analog-to-digital converter of the ESP32 microcontroller and converted into servo rotation angles using the map() function. The sensor calibration methodology is described, along with the hardware implementation based on voltage divider circuits with 22 k Ω resistors, and the software written in C within the Arduino IDE environment. Electrical schematics, images of the finished prototype, and the full program source code are provided. Experimental results demonstrate that the proposed approach ensures smooth and reproducible real-time control of the manipulator.

Keywords: *anthropomorphic manipulator, ESP32, flex sensor, servo drive, Arduino IDE, sensor calibration, control glove, rehabilitation robotics, 3D printing, embedded systems.*

Дата першого надходження
статті до видання
16.04.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
21.05.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.

УДК 681.518.3:621.311

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-11

¹Труфан М. М., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-7924-7170>¹Середюк О. Є., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8539-2693>²Пташенчук В. В., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1570-7570>¹Саманів Л. В., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1693-1961>¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна²Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ОБЛІКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ПОДВІЙНОГО КОНТРОЛЮ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У роботі розглядається проблема підвищення достовірності комерційного обліку природного газу шляхом створення інтелектуальної системи контролю якості вимірювань у вузлах обліку, які функціонують в умовах значної невизначеності, спричиненої дрейфом метрологічних характеристик сенсорів, температурно-тисковими коливаннями, випадковими збуреннями та можливим несанкціонованим втручанням. Запропоновано інтелектуальну систему контролю якості обліку енергоносіїв, яка базується на багатоагентній інформаційно-вимірювальній архітектурі та методі подвійного контролю якості обліку, який поєднує фізичну перевірку узгодженості параметрів газового потоку з аналізом часових рядів реконструйованих за допомогою алгоритмів машинного навчання. Основою розробленої системи є адаптований метод подвійного контролю, який реалізує паралельний нагляд за процесом (узгодженість параметрів) та результатом (балансові співвідношення) обліку. Для виявлення аномалій, витоків та несанкціонованого відбору застосовуються алгоритми машинного навчання (*Isolation Forest*, *DBSCAN*, автоенкодеру). Запропоновано інтегральний показник якості обліку, який забезпечує комплексну оцінку достовірності вимірювальної інформації в реальному часі. Проведено експериментальну перевірку запропонованих моделей на гібридних наборах даних (*dataset*), які включають дрейф сенсорів, шум та штучно внесені аномалії. Запропоновано використання показника залишкового метрологічного ресурсу (*RMR*) як розрахункового часового інтервалу, протягом якого інтегральний показник якості обліку природного газу залишатиметься в межах встановленого метрологічного допуску до моменту досягнення критичного рівня накопиченої похибки. Результати дослідження підтверджують перспективність гібридних підходів, що поєднують фізико-математичні моделі процесу обліку газу з методами машинного навчання, для переходу від традиційного періодичного метрологічного контролю до безперервного інтелектуального моніторингу вузлів комерційного обліку природного газу.

Ключові слова: облік природного газу, інтелектуальна вимірювальна система, метод подвійного контролю, машинне навчання, залишковий метрологічний ресурс (*RMR*), викиди, інтегральний показник якості, похибка реконструкції, гібридний *dataset*

Постановка проблеми. Облік природного газу є критичним елементом функціонування сучасної енергетичної інфраструктури, оскільки від його точності безпосередньо залежать коректність комерційних розрахунків, енергетичний баланс підприємств та ефективність управління газорозподільними мережами.

Сучасні вузли комерційного обліку природного газу являють собою складні кіберфізичні системи, що включають витратоміри, датчики тиску та температури, обчислювачі корекції об'єму та канали передачі даних. У процесі тривалої експлуатації на точність вимірювань негативно впливають деградація сенсорних елементів, дрейф калібрувальних характеристик, температурні та механічні впливи, нестабільність режимів газопостачання, похибки цифрової обробки даних, а також можливе зовнішнє несанкціоноване втручання.

Традиційна система метрологічного забезпечення базується переважно на періодичних повірках засобів вимірювальної техніки. Такий підхід не дозволяє своєчасно виявляти приховані метрологічні відхилення та аномалії, які виникають між інтервалами калібрування і поступово призводять до значних неврахованих втрат енергоносія.

У зв'язку з цим одним із найактуальніших науково-практичних завдань є розробка інтелектуальної системи безперервного контролю якості обліку природного газу, здатної в реальному часі виявляти аномалії, оцінювати достовірність вимірювальної інформації та прогнозувати залишковий метрологічний ресурс засобів вимірювання.

Останні дослідження. Проблема забезпечення достовірності комерційного обліку енергоносіїв, в тому числі і природного газу є об'єктом активних досліджень у сферах метрології, автоматизації технологічних процесів та інтелектуального аналізу даних. Традиційні методи контролю якості вимірювань базуються на статистичних підходах, таких як контрольні карти Шухарта, методи ковзного середнього, фільтр Калмана та регресійні моделі [1-3]. Ці методи добре зарекомендували себе в умовах стаціонарних лінійних режимів, проте демонструють обмежену ефективність при наявності нелінійних залежностей, дрейфу метрологічних характеристик сенсорів та нестаціонарності потоків газу.

У останні роки значного розвитку набули методи машинного навчання для виявлення аномалій у системах обліку енергоносіїв. Зокрема, автоенкодера широко застосовуються для виявлення прихованих відхилень через аналіз помилки реконструкції вхідних даних [4, 5]. Isolation Forest показав високу ефективність у задачах неконтрольованого виявлення аномалій у газових мережах завдяки здатності ізолювати викиди за допомогою випадкових дерев рішень [6]. Рекурентні архітектури типу LSTM та Transformer використовуються для прогнозування поведінки часових рядів параметрів газового потоку (тиск, температура, витрата) [7,8].

За участю авторів розроблений метод подвійного контролю [9], який базується на інтеграції даних еталонних сенсорів, польових вимірювань та алгоритмів інтелектуального аналізу для забезпечення підвищення точності, достовірності й надійності функціонування інформаційно-вимірювальних систем. Метод реалізує безперервний паралельний контроль як процесу вимірювання, так і результатів обліку, що дозволяє своєчасно виявляти деградацію сенсорів, метрологічні відхилення та аномальні режими роботи вузлів обліку.

Окремої уваги заслуговують роботи [10-11], присвячені виявленню неврахованих втрат газу, де запропонували комбінацію нейронних мереж та статистичних методів для ідентифікації неврахованого споживання.

Паралельно розвивається напрямок інтеграції фізичних моделей з алгоритмами машинного навчання (Physics-Informed Machine Learning). Такий гібридний підхід дозволяє враховувати термодинамічні закономірності газового потоку, балансові співвідношення та метрологічні обмеження, що суттєво підвищує інтерпретованість і надійність моделей у реальних умовах експлуатації [12].

Щодо оцінки метрологічної надійності засобів вимірювання, значний внесок зроблено в моделюванні деградації характеристик на основі стохастичних процесів. Зокрема, Вінерівський процес з дрейфом та функція втрат Тагучі широко застосовуються для прогнозування залишкового метрологічного ресурсу (RMR) [13,14].

Однак аналіз літератури свідчить, що питання створення комплексних систем контролю якості обліку природного газу, які одночасно поєднують фізичну (балансову та термодинамічну) перевірку параметрів, аналіз часових рядів методами машинного навчання, розрахунок інтегрального показника якості обліку, оцінку залишкового метрологічного ресурсу залишається недостатньо дослідженим. Більшість існуючих рішень орієнтовані або на чисто data-driven підходи, або на традиційні метрологічні методи без глибокої інтеграції обох парадигм у єдину систему реального часу.

Таким чином, актуальним є розробка гібридного методу подвійного контролю, який усуває зазначені прогалини шляхом поєднання фізично обґрунтованої перевірки з адаптивними алгоритмами машинного навчання.

Мета роботи є розробка та дослідження інтелектуальної системи контролю якості комерційного обліку природного газу на основі гібридного поєднання фізико-математичних моделей процесу обліку газу та сучасних методів машинного навчання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- розробити метод подвійного контролю достовірності вимірювань, який поєднує фізичну (балансову та термодинамічну) перевірку параметрів з інтелектуальним аналізом даних;
- побудувати інтегральний показник якості обліку для комплексної кількісної оцінки достовірності вимірювальної інформації в реальному часі;
- реалізувати та дослідити ансамбль алгоритмів машинного навчання (Autoencoder, Isolation Forest, LSTM) у поєднанні з методом подвійного контролю (DEC);

- провести експериментальну перевірку запропонованих моделей на синтетичних і реальних даних;
- виконати порівняльний аналіз ефективності моделей за метриками якості виявлення аномалій (ROC-AUC, Precision, Recall, F1-score).

Викладення основного матеріалу. Запропонована нами інтелектуальна система ґрунтується на концепції переходу від періодичного метрологічного контролю до безперервного інтелектуального управління якістю обліку газу в розподілених енергетичних системах в реальному часі. У межах даного підходу газорозподільна мережа формалізується як складна багатоагентна система, що складається з множини вузлів обліку $S = \{S1, S2, \dots, SN\}$. При цьому кожен з вузлів розглядається як джерело багатовимірного часового ряду даних $x_i(t)$, який інтегрує отримані значення параметрів обліку природного газу та здійснює первинну локальну обробку, нормалізацію та валідацію вимірювальної інформації з урахуванням метрологічних характеристик сенсорів і умов експлуатації. Кожен агент вузла обліку виконує функції попереднього виявлення аномалій шляхом аналізу відхилень від статистично очікуваної поведінки сигналів, а також формує узагальнені інформативні ознаки для подальшої обробки на вищих рівнях ієрархії системи.

На міжвузловому рівні реалізується кооперативна взаємодія агентів, що дозволяє здійснювати перевірку балансових співвідношень потоків газу між суміжними ділянками мережі, забезпечуючи виявлення системних невідповідностей, які не можуть бути ідентифіковані на локальному рівні.

Поняття балансу в цьому контексті означає не лише формальну рівність потоків, а як фундаментальний фізико-метрологічний принцип збереження маси газу в межах контрольованої ділянки мережі.

У системах розподілу природного газу баланс означає, що для будь-якої локальної ділянки мережі кількість газу, яка надійшла до неї за певний часовий інтервал, повинна дорівнювати сумі кількості газу, що була спожита, передана далі мережею, накопичена в об'ємі трубопроводу (через зміну тиску) або втрачена внаслідок технологічних чи аварійних причин. Математично це співвідношення можна подати як:

$$Q_{in}(t) = \sum_{i=1}^m Q_{out,i} + Q_{cons}(t) + \Delta Q_{acc}(t) + Q_{loss}(t) \quad (1)$$

де $Q_{in}(t)$ – вхідний потік газу на контрольовану ділянку;

$Q_{out,i}(t)$ – вихідний i -тий потік газу;

$Q_{cons}(t)$ – обсяг споживання кінцевими споживачами;

$\Delta Q_{acc}(t)$ – зміна акумульованого газу в трубопроводі внаслідок зміни тиску та температури;

$Q_{loss}(t)$ – технологічні або несанкціоновані втрати.

Певний вузол мережі отримує газ через один вхідний трубопровід, але далі розподіляє його між кількома споживачами або ділянками, то сумарний вихідний потік визначається як сума потоків по всіх цих i -тих напрямках

При цьому у вираз балансового співвідношення величина m визначає кількість вихідних потоків газу з контрольованої ділянки мережі або вузла обліку. Кожний потік $Q_{out,i}(t)$ відповідає окремому напрямку транспортування або споживання природного газу. Таким чином, сумарний вихідний потік формується як суперпозиція всіх каналів розподілу газу в межах локальної підсистеми.

Зі збільшенням m зростає складність задачі забезпечення метрологічної узгодженості та локалізації аномалій, що обґрунтовує доцільність застосування багатоагентного підходу та методів інтелектуального аналізу даних.

Величина, яка відображає відхилення (порушення) балансу:

$$\varepsilon B(t) = Q_{in}(t) - (\sum_{i=1}^m Q_{out,i} + Q_{cons}(t) + \Delta Q_{acc}(t) + Q_{loss}(t)) \quad (2)$$

Параметр $\varepsilon B(t)$ є ключовим індикатором достовірності обліку. Тобто, якщо значення $\varepsilon B(t)$ не перевищує допустимого метрологічного порогу, система вважає режим роботи узгодженим. Перевищення цього порогу свідчить про можливі порушення, серед яких можуть бути:

- деградація або розкалібрування витратоміра;
- дрейф температурного чи тискового сенсора;
- локальні витоки;
- несанкціонований відбір газу;
- похибки корекції до стандартних умов;

В архітектурі запропонованої інтелектуальної багатоагентної системи контролю якості обліку енергоресурсів баланс має багаторівневу природу.

Локальний баланс вузла обліку. Перевіряється фізична узгодженість параметрів усередині одного вузла. Виміряна витрата відповідає поточним значенням тиску та температури згідно з рівняннями стану газу. Якщо витрата різко змінюється без відповідної зміни тиску – це локальна аномалія.

Міжвузловий баланс. Порівнюються потоки між сусідніми вузлами мережі. Наприклад, якщо вузол S1 подає газ до вузлів S2 та S3, виконується перевірка:

$$Q_{S1}(t) = Q_{S2}(t) + Q_{S3}(t) + \Delta Q_{\text{line}}(t), \quad (3)$$

де $Q_{S1}(t)$, $Q_{S2}(t)$, $Q_{S3}(t)$ - витрати газу, які вимірюються вузлами S1, S2, S3 відповідно, а $\Delta Q_{\text{line}}(t)$ враховує допустимі втрати та компресійні ефекти.

Глобальний баланс мережі. На цьому рівні контролюється узгодженість між сумарною подачею газу в розподільчу систему та сумарним споживанням всіх підключених абонентів. Цей рівень контролю дозволяє виявити невідповідності, які не можуть бути ідентифіковані на локальному рівні, наприклад, одночасний систематичний зсув кілька вузлів обліку. В той час коли окремі лічильники можуть працювати в межах паспортної похибки глобальний баланс буде порушено. В загальному, балансовими співвідношеннями є фізично обґрунтовані рівняння збереження маси природного газу в межах контрольованих ділянок розподільної мережі. Аналіз відхилення балансу дозволяє виявляти системні аномалії обліку (викиди, похибки), приховані витоки та несанкціонований відбір, які не можуть бути достовірно ідентифіковані лише засобами локального статистичного контролю параметрів окремих вузлів.

Таким чином, формується багаторівнева система подвійного контролю, де поєднуються локальні критерії узгодженості параметрів та глобальні балансові обмеження. Метод подвійного контролю забезпечує процесу обліку (узгодженість параметрів, стабільність режимів) та результату обліку (балансові співвідношення, аномалії споживання). На рис.1 зображена схема реалізації методу подвійного контролю в запропонованій інтелектуальній системі обліку якості природного газу.

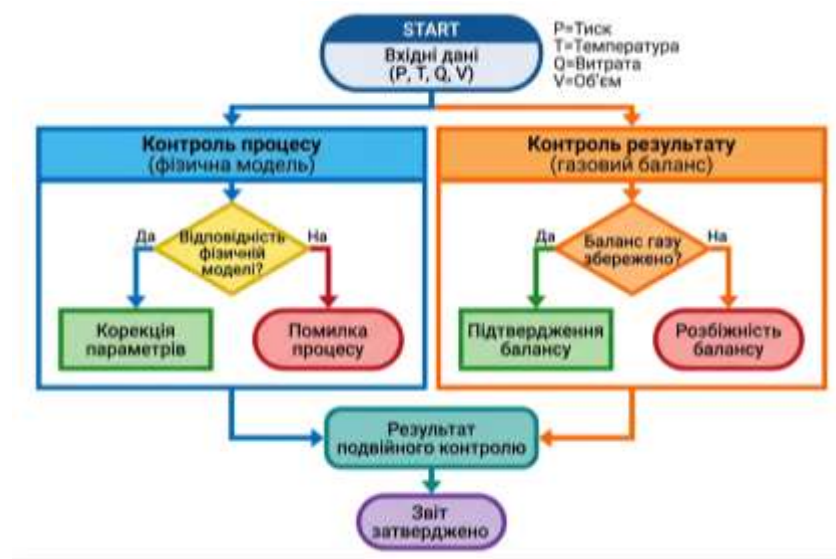


Рисунок 1 – Схема подвійного контролю якості обліку газу

Структурно система складається з таких функціональних модулів:

- модуль збору вимірювальної інформації (тиск $P(t)$, температура $T(t)$, витрата газу $Q(t)$, приведений об'єм $V(t)$);
- модуль попередньої обробки (нормалізація, усунення пропусків, фільтрація шуму);
- модуль фізичної верифікації, який перевіряє термодинамічну узгодженість, баланс потоків, стабільність режимів;
- модуль машинного навчання, який містить Autoencoder, Isolation Forest, LST;
- модуль подвійного контролю, який інтегрує фізичні та статистичні критерії;
- модуль оцінки якості, який формує інтегральний показник достовірності обліку - $QI(t)$.

Інтеграція методів машинного навчання у дану архітектуру забезпечує адаптивність системи до змін режимів споживання, сезонних коливань та деградації вимірювального обладнання. Неконтрольовані алгоритми машинного навчання (Isolation Forest, DBSCAN,

автоенкодер) застосовуються для виявлення аномалій обліку, детекції витоків і несанкціонованого відбору, ідентифікації деградації сенсорів. На рис. 2 відображено ансамблеве використання неконтрольованих алгоритмів машинного навчання в системі.



Рисунок 2 – Алгоритм ансамблевого використання методів машинного навчання.

У результаті, кожному вузлу обліку може бути поставлений у відповідність показник залишкового метрологічного ресурсу (RMR) як розрахунковий часовий інтервал, протягом якого інтегральний показник якості обліку природного газу залишатиметься в межах встановленого метрологічного допуску до моменту досягнення критичного рівня накопиченої похибки, який кількісно характеризує ступінь довіри до вимірювальної інформації та дозволяє прогнозувати момент втрати допустимої точності. Оцінка залишкового метрологічного ресурсу (RMR), реалізована на основі функції втрат Тагучі [13] та стохастичної моделі деградації (Вінерівський процес) [14], що дозволяє прогнозувати втрату достовірності вимірювань і адаптивно коригувати результати обліку.

На рисунку 3 відображено загальна парадигма інтелектуальної системи та взаємозв'язки між її елементами.

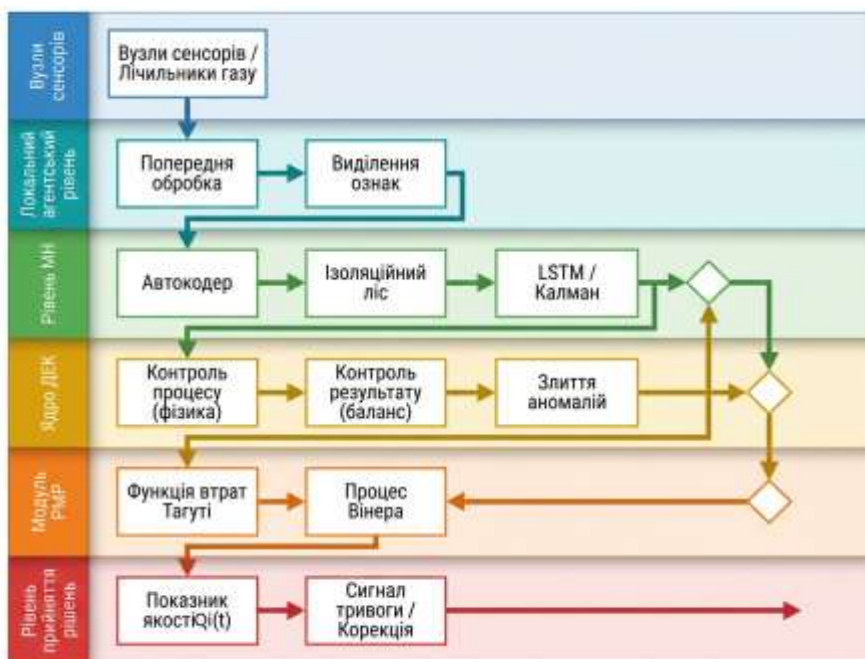


Рисунок 3 – Схема інтелектуальної системи контролю якості обліку енергоносіїв.

Центральним елементом методології є впровадження інтегрального показника якості обліку $QI(t) \in [0,1]$, що відображає ступінь достовірності отриманої інформації. Розрахунок даного показника здійснюється шляхом вагового підсумовування чотирьох критичних компонентів: узгодженості фізичних параметрів, динамічної стабільності сигналу, відсутності статистичних аномалій та дотримання балансових співвідношень у мережі:

Якість обліку описується інтегральним показником:

$$QI(t) = w_1 C_i(t) + w_2 D_i(t) + w_3 A_i(t) + w_4 B_i(t), \quad (4)$$

де $C_i(t)$ – узгодженість параметрів, $D_i(t)$ – динамічна стабільність, $A_i(t)$ – відсутність аномалій, $B_i(t)$ – баланс потоків, $w_{1..n}$ - вагові коефіцієнти визначають пріоритетність кожного фактора залежно від конфігурації вузла обліку, $\sum w_j = 1$.

Для виявлення аномалій застосовується ансамбль алгоритмів [8]:

Autoencoder – для реконструкційної похибки:

$$L_{AE} = \|x(t,n) - \hat{x}(t,n)\|^2, \quad (5)$$

де $x(t,n)$ – вектор вхідних даних;

$\hat{x}(t,n)$ – вектор реконструйованих даних. Алгоритм (5) дозволяє відокремити нормальні режими експлуатації від аномальних патернів споживання.

Isolation Forest – для швидкого виявлення статистично рідкісних подій;

LSTM-мережа – для прогнозування очікуваних значень параметрів і оцінки динамічної стабільності.

Математично цей процес описується як стохастична деградація, що підпорядковується законам Вінерівського процесу:

$$X(t) = \mu(t) + \sigma W(t), \quad (6)$$

де параметр μ відповідає за детермінований дрейф метрологічних характеристик, а складова $\sigma W(t)$ моделює випадкові впливи зовнішнього середовища. Для кількісної оцінки "ціни" похибки використовується функція втрат Тагучі [13], яка пов'язує квадрат відхилення вимірювання $e_i(t)$ з втратою економічної ефективності обліку.

$$L_i(t) = k (e_i(t))^2, \quad (7)$$

де $L_i(t)$ – економічні втрати, пов'язані з похибкою i -го вимірювального каналу,

k – коефіцієнт масштабування втрат,

$e_i(t)$ – відхилення вимірюваного параметра від еталонного або прогнозованого значення.

Величина $e_i(t)$ характеризує локальну метрологічну похибку сенсорного каналу та визначається як:

$$e_i(t) = x_i(t) - \hat{x}_1(t), \quad (8)$$

де $x_i(t)$ – фактичне значення параметра, отримане з сенсора;

$\hat{x}_1(t)$ – еталонне, прогнозоване або реконструйоване значення параметра, яке в інтелектуальній багатоагентній архітектурі може формуватися фізичною моделлю газового процесу, алгоритмами прогнозування або сусідніми агентами системи.

Використання квадратичної функції втрат дозволяє суттєво підсилити вплив великих похибок на інтегральний показник якості обліку (формула(4)), який забезпечує раннє виявлення критичних метрологічних відхилень. Такий підхід забезпечує перехід до інтелектуального управління енергоресурсами, де кожне рішення базується на динамічній оцінці рівня довіри до кожного вузла вимірювальної мережі. Це, у свою чергу, створює передумови для переходу до предиктивного метрологічного обслуговування та оптимізації витрат на перевірку засобів вимірювальної техніки.

Тому в контексті методу подвійного контролю баланс виконує роль інваріантного фізичного критерію достовірності, який доповнює статистичний аналіз часових рядів. Остаточне рішення про аномалію приймається лише за умови підтвердження відхилення обома рівнями подвійного контролю.

Однією з ключових проблем сучасних досліджень у сфері інтелектуального контролю якості обліку природного газу є відсутність відкритих реальних наборів даних, придатних для тестування алгоритмів виявлення аномалій. Більшість операторів газорозподільних мереж не надають доступу до телеметричних даних вузлів обліку через питання комерційної таємниці, критичності інфраструктури та кібербезпеки.

У зв'язку з цим у роботі нами запропоновано підхід до побудови hybrid physics-informed benchmark dataset, який поєднує реальні часові ряди вузла обліку природного газу та фізично правдоподібне моделювання аномальних режимів. Запропонований підхід дозволяє зберегти реальну структуру шумів, кореляцію між каналами, природну інерційність процесів, часову

нестабільність вимірювань та властивості реальних сенсорних сигналів. За основу для benchmark-набору виступають реальні часові ряди, отримані з вузла обліку природного газу [16]. Дані містять послідовності значень витрати газу, отримані з двох витратомірів (ультразвукового і змінного перепаду тиску) з періодичністю 15 секунд протягом 285 сек.

Однак, використання лише реальних даних не дозволяє повноцінно оцінити здатність алгоритмів виявляти аномалії, викиди або аварійні стани, оскільки більшість реальних режимів відповідає нормальній експлуатації системи. Тому для створення контрольованого benchmark-середовища у часові ряди було виконано процедуру ін'єкції фізично правдоподібних аномалій (*anomaly injection*), що передбачає керувані модифікації реальних часових рядів з метою відтворення типових порушень функціонування вузлів обліку природного газу, а саме: дрейф сенсорів (*Sensor Drift Injection*), локальних витоків газу (*Leakage Injection*), часової десинхронізації каналів телеметрії (*Synchronization Injection*), шумових сплесків (*Noise Burst Injection*) та режимів "зависання" сенсорів (*Frozen Sensor Injection*). На відміну від повністю синтетичної генерації сигналів, запропонований підхід дозволяє зберегти реальні статистичні характеристики часових рядів, природну структуру шумів, кореляцію між вимірювальними каналами та фізичну інерційність процесу транспортування природного газу. Таким чином, модифікований benchmark-набір даних залишається максимально наближеним до умов реальної експлуатації вузлів обліку. У перерахованих маніпуляцій було сформовано багатоканальний benchmark-набір даних, який містить: нормальні режими функціонування, слабковиражені аномалії, комбіновані аварійні режими, деградаційні процеси, порушення фізичного балансу. Такий підхід дозволяє оцінювати алгоритми не лише в умовах ідеалізованих порушень, а й у сценаріях, максимально наближених до реальної експлуатації вузлів обліку природного газу.

Для порівняльної оцінки ефективності моделей виявлення аномалій у задачі контролю якості обліку природного газу було обрано чотири ключові метрики: ROC-AUC, Precision, Recall та F1-score. Вибір саме цих показників обумовлений тим, що нормальні режими роботи значно переважають аномальні (витоки, дрейф сенсорів, несанкціонований відбір). У таких умовах традиційна точність (Accuracy) є непридатною, оскільки модель, яка завжди прогнозує «норму», матиме високу точність, але буде абсолютно непридатною на практиці. В результаті обробки даних різними методами отримано результати, які відображені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння ефективності моделей при виявленні аномалій

| Модель | ROC-AUC | Precision | Recall | F1-score |
|---------------------------------|---------|-----------|--------|----------|
| Isolation Forest | 0,9416 | 0,89 | 0,92 | 0,905 |
| Autoencoder | 0,6804 | 0,71 | 0,65 | 0,678 |
| LSTM | 0,5281 | 0,62 | 0,55 | 0,583 |
| Метод подвійного контролю (DEC) | 0,873 | 0,85 | 0,88 | 0,864 |

Аналіз результатів показує, що запропонований метод подвійного контролю забезпечує кращий баланс між чутливістю та специфічністю порівняно з окремими ML-моделями завдяки інтеграції фізичних закономірностей, фізичної перевірки узгодженості параметрів газового потоку та аналізу поведінки часових рядів за допомогою алгоритмів машинного навчання.

Зокрема, метод DEC досяг ROC-AUC = 0,873, що свідчить про високу загальну здатність моделі розрізняти нормальні та аномальні стани. При цьому він продемонстрував Precision = 0,85 і Recall = 0,88, що вказує на оптимальне поєднання низького рівня хибнопозитивних спрацьовувань та високої ймовірності виявлення реальних аномалій. У результаті F1-score = 0,864 перевищує відповідні показники Autoencoder (0,678) та LSTM (0,583) і є близьким до найкращого результату Isolation Forest (0,905).

Хоча Isolation Forest показав найвищий ROC-AUC (0,9416), його перевага досягається за рахунок надмірної чутливості, що може призводити до частіших хибних тривог у реальних умовах. Натомість метод DEC забезпечує більш стабільний і надійний результат, поєднуючи фізичну обґрунтованість з адаптивними можливостями машинного навчання.

Отримані результати підтверджують доцільність використання комбінованих physics-informed підходів для задач інтелектуального контролю якості обліку енергоносіїв, оскільки вони дозволяють досягти кращого компромісу між точністю, інтерпретованістю та практичною придатністю в умовах реальної експлуатації газорозподільних мереж.

Висновки. У роботі розроблено інтелектуальну багатоагентну систему контролю якості обліку природного газу, яка базується на методі подвійного контролю та машинному навчанні.

Запропонована система інтегрує фізично обґрунтовану перевірку термодинамічної узгодженості параметрів газового потоку, балансові співвідношення та динамічну стабільність з адаптивними алгоритмами машинного навчання (Autoencoder, Isolation Forest, LSTM).

Наукова новизна дослідження полягає в розробці гібридного physics-informed методу подвійного контролю, який поєднує рівні фізичного та інтелектуального аналізу даних у рамках багатоагентної архітектури. Запропоновано математичну модель інтегрального показника якості обліку (QI) та показника залишкового метрологічного ресурсу RMR, а також підхід до створення hybrid physics-informed benchmark dataset шляхом керованих ін'єкцій аномалій у реальні часові ряди. Такий підхід дозволяє ефективно поєднувати інтерпретованість фізичних моделей з високою чутливістю сучасних методів машинного навчання.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості впровадження розробленої багатоагентної системи на діючих вузлах комерційного обліку природного газу. Метод подвійного контролю забезпечує раннє виявлення метрологічних відхилень, дрейфу сенсорів, витоків та несанкціонованого відбору, що сприяє суттєвому зменшенню неврахованих втрат енергоносія, підвищенню точності комерційних розрахунків та переходу від періодичного метрологічного контролю до предиктивного обслуговування засобів вимірювальної техніки.

Експериментальні дослідження з використанням гібридного dataset підтвердили ефективність запропонованого підходу, який методом подвійного контролю досяг ROC-AUC = 0,873, F1-score = 0,864, продемонструвавши кращий баланс між Precision та Recall порівняно з окремими моделями машинного навчання. Подальші дослідження будуть спрямовані на масштабну валідацію запропонованої системи на великих масивах реальних даних, отриманих з різних типів вузлів обліку природного газу, а також на інтеграцію методу подвійного контролю з технологіями цифрових двійників та Retrieval-Augmented Generation (RAG). Використання RAG-підходу дозволить реалізувати інтелектуальну підтримку прийняття рішень та створювати бази технологічних знань функціонування вузлів обліку.

Крім того, перспективним напрямом є розробка адаптивних механізмів динамічного налаштування вагових коефіцієнтів між рівнями фізичного, балансового та ML-контролю залежно від поточного стану мережі й характеристик вимірювального середовища. Розроблені підходи створюють передумови для формування нового покоління інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем енергетичного сектору, здатних забезпечувати високий рівень метрологічної надійності, пояснюваності прийнятих рішень та економічної ефективності обліку енергоносіїв в умовах цифрової трансформації критичної інфраструктури.

Інформаційні джерела

1. Montgomery D. C. Introduction to Statistical Quality Control. 8th ed. Hoboken : Wiley, 2020. 752 p.
2. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82, No. 1. P. 35–45. (DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3662552>.)
3. Володарський Є. Т., Кухарчук В. В., Поджаренко В. О., Сердюк Г. Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. Навчальний посібник. – Вінниця : ВНТУ, 2001. – 219 с.
4. Ihsan A.F., et al., "Deep Learning Based Anomaly Detection on Natural Gas Pipeline Operational Data," in Proc. IEEE Conference on Big Data and Analytics, 2022, pp. 1-8. (DOI: <https://doi.org/10.1109/ICBDA55046.2022.10037988>.)
5. ElMahdy O.F.M. et al. Machine learning anomaly detection of lost and unaccounted for gas in natural gas networks, *Journal of Engineering and Applied Science*, 72(1) 2025. (DOI: <https://link.springer.com/article/10.1186/s44147-025-00677-x>).
6. Liu F. T., Ting K. M., Zhou Z. -H., "Isolation Forest", 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining, Pisa, Italy, 2008, pp. 413-422. (DOI: 10.1109/ICDM.2008.17).
7. Zheng S., Zhu Z., Chen L., Anomaly Q. Detection and correction of power metering data based on machine learning algorithm, *Science and Technology for Energy Transition*, vol. 80, 2025. (DOI: 10.2516/stet/2024106).
8. Lee S., Jung M., Kim H. "Smart metering system with BiLSTM autoencoder capable of anomaly detection by", 2022 IEEE 40th International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, USA, 2022, pp. 1-3. (DOI: 10.1109/ICCE53296.2022.9730398).
9. Orest Serediuk, Mykhailo Trufan, Theoretical foundations of the dual control algorithm for multi-agent information-measuring systems *Measuring equipment and metrology*. Vol. 86, No. 1, 2025, pp.5-12. (DOI: <https://doi.org/10.23939/istcm2025.01>.)

10. Soltanisarvestani, A. , Safavi A. A., Rahimi M. The Detection of Unaccounted for Gas in Residential Natural Gas Customers Using Particle Swarm Optimization-based Neural Networks, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy* 18 (1)2022. (DOI:10.1080/15567249.2022.2154412).
11. Akpınar M., Arslan K., Adak F. The detection of unaccounted natural gas consumption: A neural networks and subscriber-based solution *Engineering Science and Technology, an International Journal* Vol 52, April 2024 pp.44-49. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101669>).
12. Zhang C., et al., Nested physics-informed neural network for analysis of transient flows in natural gas pipelines, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 126, Part B, 106073, 2023. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106073>).
13. Taguchi G., Chowdhury S., and Wu Y., *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, Wiley, 2005.
14. Chen J., Zhang Z., Zhong C., et al. Research on the Life Prediction Method of Meters Based on a Nonlinear Wiener Process. *Electronics*, vol. 11, no. 13, 2022. (DOI: 10.3390/electronics11132026).
15. Wang Z., Li J., Zhang Y., Fu H., Liu C., Krishnaswamy S. A novel Wiener process model with measurement errors for degradation analysis. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2016, vol. 18, no. 3, pp. 396–405. (DOI: 10.17531/ein.2016.3.11).
16. Середюк О. Є., Лютенко Т. В. Експериментальні дослідження вузлів обліку природного газу різних принципів дії. *Метрологія та прилади*. 2015. № 3 (53). С. 51–56.
17. Труфан М.М.Репозиторій GitHub <https://github.com/TIMCON23/gas-quality.git>

UDC 681.518.3:621.311

¹Trufan M., ¹Serediuk O., ²Ptashenchuk V., ¹Samaniv L.

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

²Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

INTELLIGENT MULTI-AGENT QUALITY CONTROL SYSTEM FOR NATURAL GAS METERING BASED ON THE DUAL-CONTROL METHOD AND MACHINE LEARNING

This paper addresses the problem of enhancing the reliability of commercial natural gas metering by developing an intelligent measurement quality control system for metering stations operating under conditions of significant uncertainty. This uncertainty is driven by the drift of sensor metrological characteristics, temperature and pressure fluctuations, random disturbances, and potential unauthorized tampering. An intelligent quality control system for energy resource metering is proposed, based on a multi-agent information and measurement architecture and a dual-control metering quality method. This method combines the physical verification of gas flow parameter consistency with the analysis of time series reconstructed via machine learning algorithms. The core of the developed system is an adapted dual-control method that implements parallel oversight of both the process (parameter consistency) and the outcome (balance relations) of the metering. To detect anomalies, leaks, and unauthorized extraction, machine learning algorithms (Isolation Forest, DBSCAN, and autoencoders) are applied. An integral metering quality indicator is proposed, providing a comprehensive, real-time assessment of measurement information reliability. Experimental validation of the proposed models was conducted using hybrid datasets that incorporate sensor drift, noise, and artificially introduced anomalies. The use of the Remaining Metrological Resource (RMR) indicator is proposed as a calculated time interval during which the integral natural gas metering quality indicator will remain within the established metrological tolerance before reaching a critical level of accumulated error.

The research results confirm the viability of hybrid approaches that combine physical and mathematical models of the gas metering process with machine learning methods. This facilitates a transition from traditional periodic metrology control to continuous intelligent monitoring of commercial energy resource metering stations, including those for natural gas.

Key words: natural gas metering, intelligent measurement system, dual-control method, machine learning, remaining metrological resource (RMR), outliers, integral quality indicator, reconstruction error, hybrid dataset.

Дата першого надходження
статті до видання
15.04.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
18.05.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.

УДК. 621.338.27:537.221

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-12

¹Яценко І. В., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5131-8930>²Антонюк В. С., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0690-2411>¹Ващенко В. А., ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0722-9353>¹Колінько С.О., ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0234-8655>¹Бутенко Т. І., ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3065-5772>¹Цибулін В. В., ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2805-572X>¹Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна²Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ОПЛАВЛЕННЯ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИЛАДІВ ПРИ ПОВЕРХНЕВІЙ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ОБРОБЦІ

При електронно-променевої обробці оптичних елементів приладів рухомими стрічковими електронними потоками (СЕР) важливе практичне значення має прогнозування оптимальних значень глибини рідкої ванни, які не призводять до змін їх форми та розмірів. В зв'язку з цим актуальними є постановка й розв'язання задачі про математичне моделювання процесу оплавлення оптичних матеріалів, оброблюваних рухомим СЕР. Розроблено та досліджено математичні моделі оплавлення оптичних елементів приладів з оптичного скла марок К8, К108 та ін. різної геометричної форми (оптичні пластини, прямокутні бруски та ін.) та розмірів, враховуючи температурні залежності теплофізичних властивостей оптичного матеріалу (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності), рухомим СЕР при багатоцикловій та одноцикловій обробці в залежності від сукупності його параметрів (струму електронного потоку, прискорювальної напруги, відстані від оброблюваної поверхні, швидкості переміщення електронного потоку та часу обробки). Це дозволяє більш точно розраховувати розподіли температури уздовж поверхні й по глибині розплаву та максимальної товщини оплавленого шару оброблюваного елемента для різних значень керованих параметрів СЕР та визначати допустимі діапазони їх зміни, перевищення яких призводить до порушення площинності оброблюваної поверхні оптичних елементів, порушенню їх геометричної форми, погіршення метрологічних характеристик оптичних приладів та, у кінцевому підсумку, до відмови приладів на їх основі.

Ключові слова: електронно-променева технологія, оптичне скло, стрічковий електронний потік, методи теорії теплопровідності.

Постановка проблеми. При аналізі технологічних режимів електронно-променевого полірування виробів мікрооптики, оптоелектроніки й ін. важливе практичне значення має вміння прогнозувати допустимі значення глибини розплаву, що утворюється на поверхні виробів з оптичних матеріалів (оптичне скло К8, К108 та ін.) в залежності від різних режимів обробки (сукупності параметрів СЕР: струму електронного потоку I_e (мА), прискорювальної напруги U_e (кВ), відстані від оброблюваної поверхні l (м), швидкості переміщення електронного потоку V (м/с) та часу обробки τ (с)). Це пов'язано з тим, що при виникненні, наприклад, глибокої ванни рідкого розплаву на поверхні виробів (більше ніж 200...300 мкм), що обробляються електронним потоком, виникає істотне розтікання розплаву матеріалу по поверхні, що призводить до порушення їх геометричної форми. В результаті, це призводить до браку таких виробів. У зв'язку з цим важливого практичного значення набувають постановка й розв'язання задачі математичного моделювання процесу оплавлення оптичних елементів приладів при їх електронно-променевої обробці. Цей процес розглядатимемо при наступних режимах обробки: багатоцикловий (скануючий) рух стрічкового електронного потоку по поверхні пластини кінцевої товщини (нестационарний режим), а також одноцикловий рух вздовж поверхні прямокутного бруска великої товщини (квазістационарний режим) [1-5, 9, 10].

Аналіз останніх досліджень. Нині є достатня кількість робіт по поверхневому та глибокому оплавленню різних матеріалів зовнішніми джерелами термовпливу (локальний кондуктивний або конвективний нагрів, радіаційне випромінювання) [2,3]. Однак кількість досліджень по оплавленню оптичних матеріалів рухомими джерелами теплового впливу вельми обмежена. При цьому не досліджено вплив виду обробки матеріалів рухомим джерелом

(багатоцикловий (скануючий) або одноцикловий рух джерела вздовж оброблюваної поверхні) на основні характеристики процесу їх оплавлення (розподіл температури по товщині та вздовж поверхні елемента, швидкість оплавлення та товщину оплавленого шару та ін.). Практично відсутні дані по впливу керованих параметрів СЕП на вказані вище характеристики оплавлення розглядуваного оптичного скла (К8, К108, К208 та ін.), яке широко використовується у різних оптико-електронних приладах [5,8]. Не визначено допустимі діапазони зміни параметрів СЕП, перевищення яких призводить до порушення площинності оброблюваної поверхні оптичних елементів, порушенню їх геометричної форми та, у кінцевому підсумку, до відмови приладів на їх основі.

Мета роботи. Метою роботи є розробка математичних моделей процесу оплавлення оптичних елементів рухомих СЕП для різних типів технологічних операцій (багатоцикловий та одноцикловий рух СЕП уздовж оброблюваної поверхні елемента), розрахунок основних характеристик цього процесу та визначення допустимих діапазонів зміни керованих параметрів СЕП, що не допускають глибокого оплавлення оптичних елементів, яке призводить до погіршення метрологічних характеристик приладів, аж до виходу їх з ладу.

Викладення основного матеріалу. Математична модель процесу оплавлення оптичних пластин. Розглянемо режим обробки пластини багатоцикловим (скануючим) СЕП. При цьому на її поверхню буде поступати рівномірно розподілений тепловий потік. Встановлюється температура T_n поверхні, яка визначається з наступних умов [1, 5, 7]: $T^* = (0,9...0,95) \cdot T_n$, $T^* = (0,9...0,95) \cdot T_n$ – температура текучості (рідкого стану) оптичного матеріалу, яка визначається з експериментально встановлених залежностей $\eta(T)$ (η – в'язкість розплаву оптичного матеріалу): наприклад, для скла К-8 значення $T^* = 1400$ К (рис. 1).

Так як глибина зони термічного впливу $\delta \ll H$ та $\delta > B, L$ (H, B, L – товщина, ширина і довжина пластини відповідно), то маємо одновимірність розповсюдження тепла углиб пластини, що відповідає $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$. Рівняння математичної моделі задачі, що розглядається, є нелінійним рівнянням теплопровідності з граничними умовами IV роду, при цьому теплообмін на нижній стороні пластини не впливає на температурне поле в пластині. Так як електронно-променева обробка відбувається у вакуумі, то нехтуємо тепловтратами за рахунок конвекції і випромінювання [1, 6 - 9]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad t > 0, \quad z > 0, \quad (1)$$

$$T|_{z=0} = T_n, \quad t \geq 0, \quad (2)$$

$$T|_{z=\xi(t)} = T^*, \quad t \geq 0, \quad (3)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\xi(t)} = \lambda_n \cdot \rho \cdot \frac{d\xi}{dt}, \quad t \geq 0, \quad (4)$$

де $\xi(t)$ – змінна товщина оплавленого шару ($\xi(0) = 0$); λ_n – прихована теплота фазового переходу; ρ – густина розплаву оптичного матеріалу.

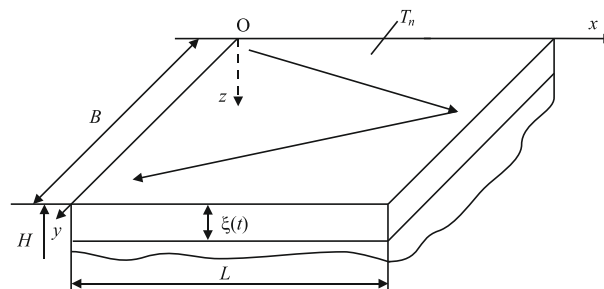


Рисунок 1 – Схема поліровки оптичної пластини при багатоцикловому русі СЕП

З врахуванням емпіричної залежності теплофізичних властивостей оптичного матеріалу від температури (об'ємної теплоємності $C_V(T) = C_{V0} \cdot T^{\nu}$, коефіцієнта теплопровідності

$\lambda(T) = \lambda_0 \cdot T^\nu$, де $C_{\nu 0}$, λ_0 – емпіричні константи [1, 10, 11]) рівняння (1) – (4) перетворюються до вигляду:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad t > 0, \quad 0 < z < \zeta(t), \quad (5)$$

$$\theta|_{z=0} = \varphi, \quad t \geq 0, \quad (6)$$

$$\theta|_{z=\zeta(t)} = 0, \quad t \geq 0, \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{z=\zeta(t)} = A \cdot \frac{d\zeta}{dt}, \quad t \geq 0, \quad (8)$$

де
$$\theta = T^{\nu+1} - T^{*\nu+1}, \quad A = -\frac{\lambda_n \rho \cdot (\nu+1)}{\lambda_0}, \quad a_0^2 = \frac{\lambda_0}{C_{\nu 0}}, \quad \varphi = T_n^{\nu+1} - T^{*\nu+1}. \quad (9)$$

У вказаній задачі (5) – (8) вимагається визначити закони руху фронту плавлення ($\zeta(t)$, $\frac{d\zeta(t)}{dt}$) та функцію $\theta(z,t)$. Для розв'язання задачі (5) – (8) використовуємо методи теорії інтегральних перетворень у областях з межами, що рухаються [1, 3, 5, 10].

В результаті одержуємо наступне рішення початкової задачі:

$$T(z,t) = \left\{ T^{*\nu+1} - \frac{2a_0^2 \beta \lambda_n \rho \cdot (\nu+1)}{\pi \lambda_0} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \cdot e^{-\left(\frac{\pi n a_0}{\beta}\right)^2} \cdot \int_0^{\frac{\pi n a_0}{\beta}} e^{a_0^2 u^2} \cdot \sin(\beta u) du + \frac{2 \cdot (T_n^{\nu+1} - T^{*\nu+1})}{\pi n} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{\pi n a_0}{\beta}\right)^2} \right) \right] \cdot \sin\left(\frac{\pi n z}{\beta \sqrt{t}}\right) \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}, \quad 0 < z < \beta \sqrt{t}, \quad (10)$$

$$\zeta(t) = \beta \sqrt{t}, \quad \frac{d\zeta}{dt} = \frac{\beta}{2 \sqrt{t}} \quad (11)$$

де β знаходиться з наступного трансцендентного рівняння

$$\frac{\varphi}{A \cdot a_0 \sqrt{\pi}} = \beta \cdot e^{a_0^2 \beta^2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\beta}{2a_0}\right). \quad (12)$$

Обмежившись першими N членами ряду і вважаючи $T^* = 0,925 \cdot T_n$, одержуємо наступний вираз для профілю температури по глибині розплаву, що утворюється на поверхні оптичної пластини при поліровці її скануючим СЕП:

$$T(z,t) = \left\{ T^{*\nu+1} - \frac{2a_0^2 \beta \lambda_n \rho \cdot (\nu+1)}{\pi \lambda_0} \cdot \sum_{n=1}^N \left[\frac{1}{n} \cdot e^{-\left(\frac{\pi n a_0}{\beta}\right)^2} \cdot \int_0^{\frac{\pi n a_0}{\beta}} e^{a_0^2 u^2} \cdot \sin(\beta u) du + \frac{2 \cdot T^{*\nu+1} (1,081^{\nu+1} - 1)}{\pi n} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{\pi n a_0}{\beta}\right)^2} \right) \right] \cdot \sin\left(\frac{\pi n z}{\beta \sqrt{t}}\right) \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}, \quad 0 < z < \beta \sqrt{t}. \quad (13)$$

Математична модель процесу оплавлення прямокутних брусків. Постановка даної задачі полягає в такому: розглядається процес формування на поверхні зони обробки розплаву, обсяг якого з часом може змінюватися, прямуючи до деякого квазістаціонарного стану. Утворення рідкої фази здійснюється джерелом теплоти (рухомий СЕП), яке має нормальний розподіл густини теплового впливу $q_n(x)$ й переміщується з постійною швидкістю V уздовж поверхні

прямокутного бруска великої товщини, що є основним виробом різних інтегрально-оптичних мікросхем (рис. 2).

Крім цього, для використовуваних на практиці діапазонів зміни швидкостей руху СЕП ($V = 0...0,1$ м/с процес електронно-променевої обробки оптичних елементів близький до квазістаціонарного (критерій Пекле $Pe = \frac{V \cdot B}{4a_0^2} \ll 1$) [1, 7].

Також, як й у випадку пластини, нехтуючи теплообміном на нижньому боці бруска, конвективними й радіаційними тепловтратами, для математичного опису температурних полів у розглянутому прямокутному бруску маємо таке квазістаціонарне нелінійне рівняння теплопровідності з граничною умовою II роду [1, 7, 11, 12]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right] - C_V(T) \cdot V \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad (14)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(x), \quad (15)$$

$$T \rightarrow T_0, \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right), \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \rightarrow 0 \quad \text{при } x \rightarrow \pm\infty, z \rightarrow +\infty. \quad (16)$$

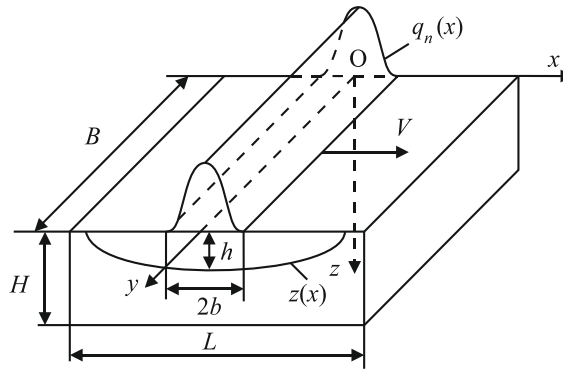


Рисунок 2 – Схема полірування оптичного прямокутного бруска при одноцикловому русі СЕП ($\frac{\partial T}{\partial x} \neq 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} \neq 0, \frac{\partial T}{\partial t} = 0$, тому що глибина проникнення теплової хвилі $\delta \gg B, \delta \ll H, L$):

$2b$ – ширина рухомого джерела тепла; B, H, L – ширина, товщина й довжина бруска;
 $z(x)$ – рівняння координатної лінії початку утворення рідкої фази

З використанням отриманих результатів експериментальних досліджень щодо зондування СЕП для $q_n(x)$ маємо такий вираз:

$$q_n(x) = \frac{I_n \cdot V_y}{B} \cdot \sqrt{\frac{k_0(I_n, l)}{\pi}} \cdot \frac{e^{-k_0(I_n, l) \cdot x^2}}{\text{erf}[b(I_n, l) \cdot \sqrt{k_0(I_n, l)}]}, \quad (17)$$

$$k_0(I_n, l) = 9,367 \cdot 10^7 - 7,8598 \cdot 10^8 \cdot l - (5,1 \cdot 10^4 - 1,3 \cdot 10^5 \cdot l) \cdot I_n, \quad (18)$$

$$b(I_n, l) = \frac{1,73}{\sqrt{k_0(I_n, l)}}, \quad (19)$$

З врахуванням залежностей $C_V(T)$ та $\lambda(T)$ [1, 7, 12] та використовуючи методи інтегральних перетворень Фур'є по координатах x та y [7], отримуємо такий вираз для розподілу температури уздовж поверхні й по глибині розплаву, що утворюється на поверхні оптичного прямокутного бруска при впливі на нього рухомого СЕП:

$$T(x, z) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1) \cdot I_n \cdot V_y \cdot \sqrt{k_0(I_n, l)} \cdot e^{-\frac{Vx}{2a_0^2}}}{2\pi^2 \cdot \lambda_0 \cdot \text{erf}(b(I_n, l) \cdot \sqrt{k_0(I_n, l)})} \cdot \int_{-b(I_n, l)}^{b(I_n, l)} K_0 \left[\frac{V}{2a_0^2} \cdot \sqrt{(x-\xi)^2 + z^2} \right] \cdot e^{-k_0(I_n, l) \xi^2} d\xi \right\}^{\frac{1}{v+1}}, \quad (20)$$

де K_0 – циліндрична функція уявного аргументу нульового порядку другого роду [7].

Виключаючи режими глибокого оплавлення оброблюваних прямокутних елементів, тобто приймаючи $h \ll 2b$ ($h(x)$ – глибина оплавлення елемента), одержуємо таке подання функції $K_0(y)$:

$$K_0(y) \approx -\ln y = -\left[\ln\left(\frac{V}{2a_0^2}\right) + \frac{1}{2} \cdot \ln((x - \xi)^2 + z^2) \right]. \quad (21)$$

Підставляючи (21) у (20), одержуємо такий вираз для розподілу температури уздовж поверхні й по глибині розплаву невеликої товщини:

$$T(x, z) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1) \cdot I_L \cdot V_y \cdot \sqrt{k_0(I_L, l)} \cdot e^{-\frac{Vx}{2a_0^2}}}{2\pi^2 \cdot \lambda_0 \cdot \operatorname{erf}(b(I_L, l) \cdot \sqrt{k_0(I_L, l)})} \cdot \int_{-b(I_L, l)}^{b(I_L, l)} \left[\ln\left(\frac{V}{2a_0^2}\right) + \frac{1}{2} \cdot \ln((x - \xi)^2 + z^2) \right] \cdot e^{-k_0(I_L, l) \xi^2} d\xi \right\}^{\frac{1}{v+1}}. \quad (22)$$

З отриманої формули (22) по координатній лінії початку утворення рідкої фази

$$T^* = T(z, x)|_{z=h} \quad (23)$$

визначається товщина оплавленого шару $h(x)$. Розглянемо максимальну товщину оплавленого шару h_m й вплив на неї параметрів СЕП, тому що це дасть змогу визначати допустимі діапазони їхньої зміни (відразу для всієї оброблюваної поверхні бруска), які не дозволяють у процесі полірування розглядуваних брусків перевищувати гранично допустимі значення $h = h^*$, що призводять до зміни геометричної форми оброблюваних виробів і, врешті-решт, до їхнього відбраковування. З огляду на (22) і (23), для величини h_m одержуємо такий вираз:

$$T^* = T(0, z)|_{z=h_m}, \quad (24)$$

де

$$T(0, z) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1) \cdot I_L \cdot V_y \cdot \sqrt{k_0(I_L, l)}}{2\pi^2 \cdot \lambda_0 \cdot \operatorname{erf}(b(I_L, l) \cdot \sqrt{k_0(I_L, l)})} \cdot \int_{-b(I_L, l)}^{b(I_L, l)} \left[\ln\left(\frac{V}{2a_0^2}\right) + \frac{1}{2} \cdot \ln(z^2 + \xi^2) \right] \cdot e^{-k_0(I_L, l) \xi^2} d\xi \right\}^{\frac{1}{v+1}}. \quad (25)$$

Розрахунки впливу параметрів СЕП на глибину оплавлення пластин та брусків з оптичного скла, вибір допустимих режимів поверхневого оплавлення. По отриманим формулам (10) – (13) з використанням стандартних пакетів прикладних програм [1] для оптичного скла К8, що широко використовуються на практиці, були проведені розрахунки розподілів температури по глибині розплаву, товщини оплавленого шару та законів руху розділу фаз.

Результати розрахунків для пластини при багатоцикловогому русі. В результаті проведених розрахунків (рис. 3 – 6) було встановлено, що температура розплаву незалежно від його глибини із збільшенням часу обробки пластини зростає і виходить на плато, тобто спостерігається квазістаціонарний режим оплавлення пластини ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ при $t \geq 0,5 \dots 0,6$ с). При цьому температура по глибині розплаву (до 300 мкм) зменшується: наприклад, для часів обробки пластини $t = 0,1 \dots 0,5$ с температура розплаву зменшується у 1,1...1,2 разу. Що стосується оплавленого шару, то він на поверхні пластини формується протягом перших десятих часток секунди і далі істотно збільшується із зростанням часу обробки: наприклад, при збільшенні t від 0,1 до 0,6 с значення y зростають у 3 рази. При цьому швидкість оплавлення поверхні пластини із збільшенням часу її обробки спочатку різко зменшується (при збільшенні t від 0,01 с до 0,4 с значення $\frac{dy}{dt}$ зменшуються у 6,5 разу), а потім цей процес істотно сповільнюється (при збільшенні t від 0,4 с до 0,6 с значення $\frac{dy}{dt}$ зменшуються вже у 1,2 разу).

Таким чином, при багатоциклової електронній обробці пластини (нестационарний режим) на її поверхні за лічені частки секунди ($t = 0,1 \dots 0,2$ с) утворюється розплавлений шар великої товщини (до 300...400 мкм), тобто при одночасному оплавленні відразу всієї оброблюваної

поверхні пластини (при багатоцикловогому русі СЕП створюється аналог рівномірно розподіленого теплового впливу уздовж всієї оброблюваної поверхні) допустимими є наступні

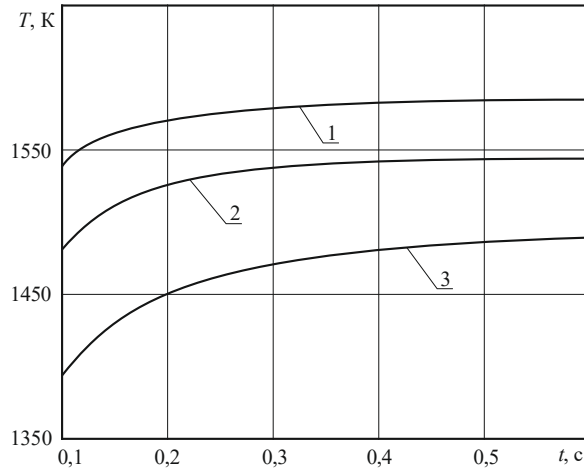


Рисунок 3 – Зміна температури розплаву на різних відстанях від поверхні пластини залежно від часу її обробки скануючим СЕП ($a_0^2 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda_0 = 0,068 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^{1/2}$, $\nu = 0,479$, $T^* = 1400 \text{ К}$, $\rho = 2,52 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\lambda_n = 1,7 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$, $\beta = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{1/2}$): 1 – $z = 50 \text{ мкм}$; 2 – $z = 100 \text{ мкм}$; 3 – $z = 300 \text{ мкм}$

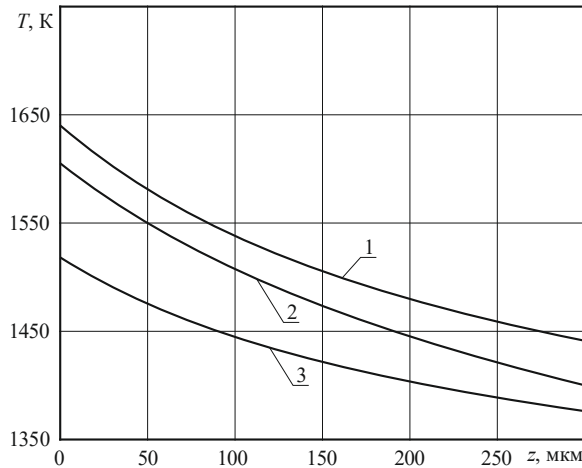


Рисунок 4 – Зміна температури по глибині розплаву для різних часів обробки пластини скануючим СЕП: 1 – $t = 0,5 \text{ с}$; 2 – $t = 0,3 \text{ с}$; 3 – $t = 0,1 \text{ с}$; (решта позначень аналогічна рис. 3)

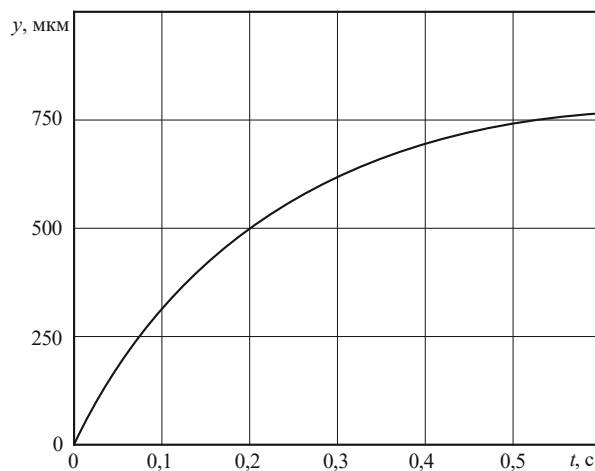


Рисунок 5 – Залежність товщини оплавленого шару від часу обробки пластини скануючим СЕП (решта позначень аналогічна рис. 3)

діапазони зміни часу її електронної обробки: $t < 0,05 \dots 0,1$ с, оскільки в цьому випадку на поверхні пластини формується розплавлений шар товщиною не більше 100...200 мкм, який не призводить до порушення площинності поверхні пластини, утворення напливів і т. ін., і, зрештою, до порушення геометричної форми виробів і до їх відбраковки.

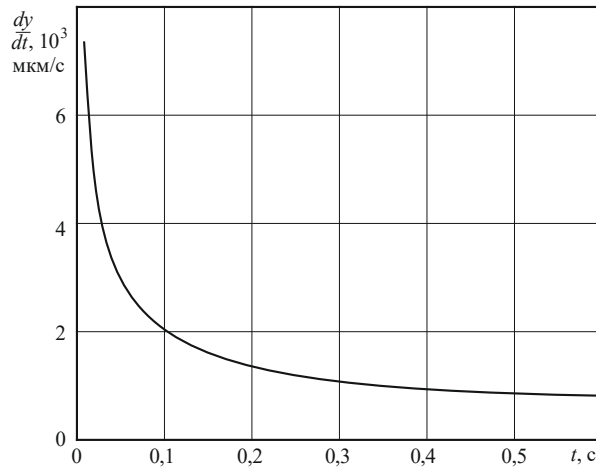


Рисунок 6 – Залежність швидкості оплавлення поверхні пластини від часу її обробки скануючим СЕП (решта позначень аналогічна рис. 3)

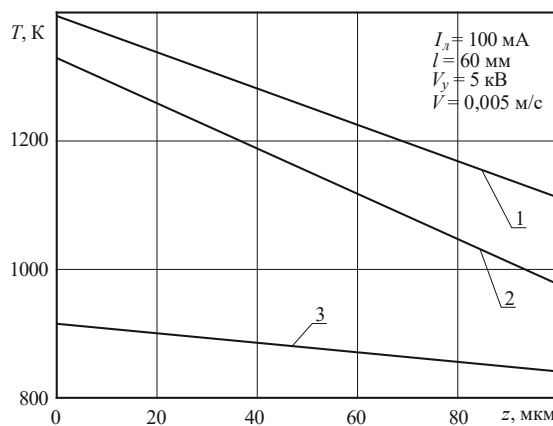


Рисунок 7 – Розподіл температури по глибині прямокутного елемента, оброблюваного СЕП при його одноцикловому русі ($T_0 = 823$ К, $a_0^2 = 6 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\lambda_0 = 0,068$ Вт/м·К ^{$\nu+1$} , $\nu = 0,479$):
1 – $x = -100$ мкм; 2 – $x = 0$ мкм; 3 – $x = 100$ мкм

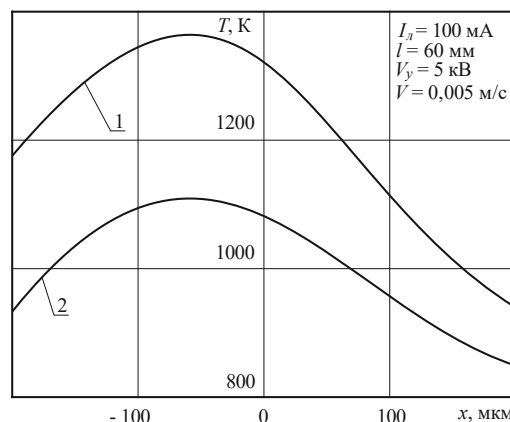


Рисунок 8 – Розподіл температури в напрямку руху СЕП уздовж оброблюваної поверхні прямокутного елемента: 1 – $z = 10$ мкм; 2 – $z = 100$ мкм (інші позначення аналогічні рис. 7)

Результати розрахунків для бруска при одноцикловому русі СЕП. За отриманими формулами (22) і (24) з використанням стандартних пакетів прикладних програм [1] для

оптичного скла К8 були проведені розрахунки розподілу температури уздовж поверхні й по глибині розплаву, максимальної товщини оплавленого шару й впливу на них керування

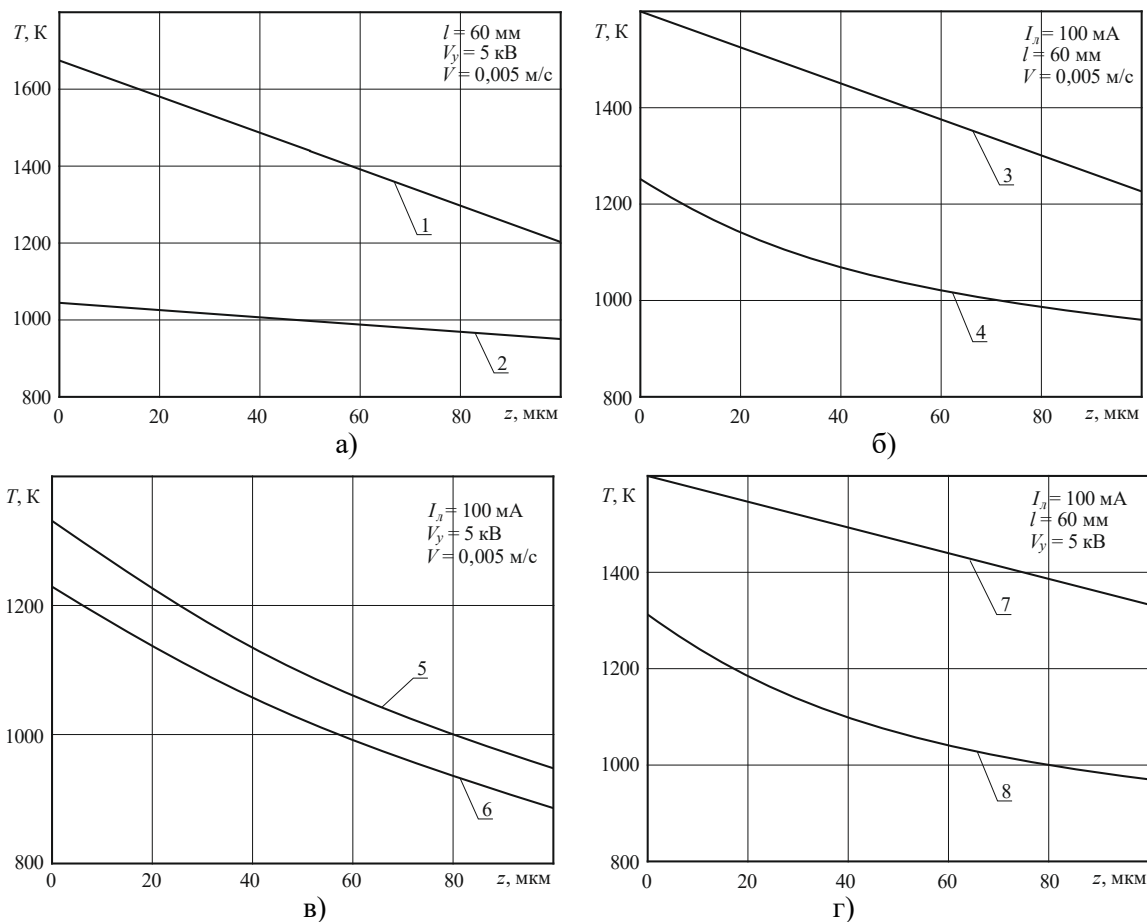


Рисунок 9 – Вплив параметрів СЕП на розподіл температури по глибині оброблюваного прямокутного елемента ($x = 0$): а) – вплив струму електронного потоку I_l (1 – $I_l = 300$ мА, 2 – $I_l = 50$ мА); б) – вплив прискорювальної напруги V_y (3 – $V_y = 8$ кВ, 4 – $V_y = 4$ кВ); в) – вплив відстані від оброблюваної поверхні l (5 – $l = 60$ мм, 6 – $l = 80$ мм); г) – вплив швидкості переміщення електронного потоку V (7 – $V = 0,002$ м/с, 8 – $V = 0,005$ м/с)

параметрів СЕП (рис. 7 – 11). Із поданих результатів розрахунків по розподілах температури уздовж поверхні й по глибині оброблюваного оптичного бруска випливає, що для різних точок поверхні температура зі збільшенням глибини (уздовж осі Oz) зменшується, а в напрямку руху СЕП (уздовж осі Ox) має максимум T_{max} , величина якого істотно залежить від параметрів СЕП (наприклад, збільшення I_l від 50 мА до 300 мА й V_y від 4 кВ до 8 кВ приводить до збільшення T_{max} відповідно в 1,6 й 1,3 разу, а збільшення l від 60 мм до 80 мм й V від 0,002 м/с до 0,005 м/с приводить уже до зменшення T_{max} відповідно в 1,1 й 1,2 разу) і зміщена від центра джерела теплового впливу ($x = 0$) у бік, протилежний руху СЕП (на відстанях 50...80 мкм для досліджених діапазонів зміни параметрів СЕП). Таким чином, при одноцикловій електронній обробці брусків (квазістаціонарний режим оплавлення) розплавлений шар максимальної товщини утворюється ліворуч від центра рухомого СЕП ($x = 0$) на відстанях порядку 50...80 мкм; при цьому розходження між T_{max} і $T|_{x=0}$ не перевищують 5...8 %, що дозволяє в межах зазначеної похибки визначати величину h_m по координатній лінії початку утворення рідкої фази (див. формулу (24)). Зіставлення результатів розрахунків по температурі в центрі СЕП з експериментальними даними показує, що розходження між ними не перевищують 10...12 %. Аналіз результатів розрахунків залежностей $h_m = f(I_l, V_y, l, V)$ показує, що на величину h_m найбільший вплив справляють параметри I_l і V : так, при $I_l > 300...400$ мкм й $V < 10^{-3}...2 \cdot 10^{-3}$ м/с значення h_m можуть уже значно перевищувати 100...200 мкм (у кілька разів). Зіставлення результатів розрахунків залежностей h_m від параметрів СЕП з експериментальними даними показує, що розходження між ними не перевищують 10...15 %. Одержуємо, що при технологічних процесах полірування оптичних брусків рухомим СЕП мають існувати їх гранично допустимі режими (сукупності критичних

значень параметрів СЕП), недотримання яких призводить до відбраковування виробів. Так, зокрема для оптичного скла К8 допустимими режимами полірування є такі сукупності параметрів СЕП: $I_n < 300$ мА, $V > 10^{-3}$ м/с, $V_y = 4...8$ кВ, $l = 60...80$ мм.

Отримані результати розрахунків повністю відповідають даним технологічних експериментів по відпрацюванню процесів фінішного полірування виробів мікрооптики, інтегральної й волоконної оптики [5, 9, 11, 12].

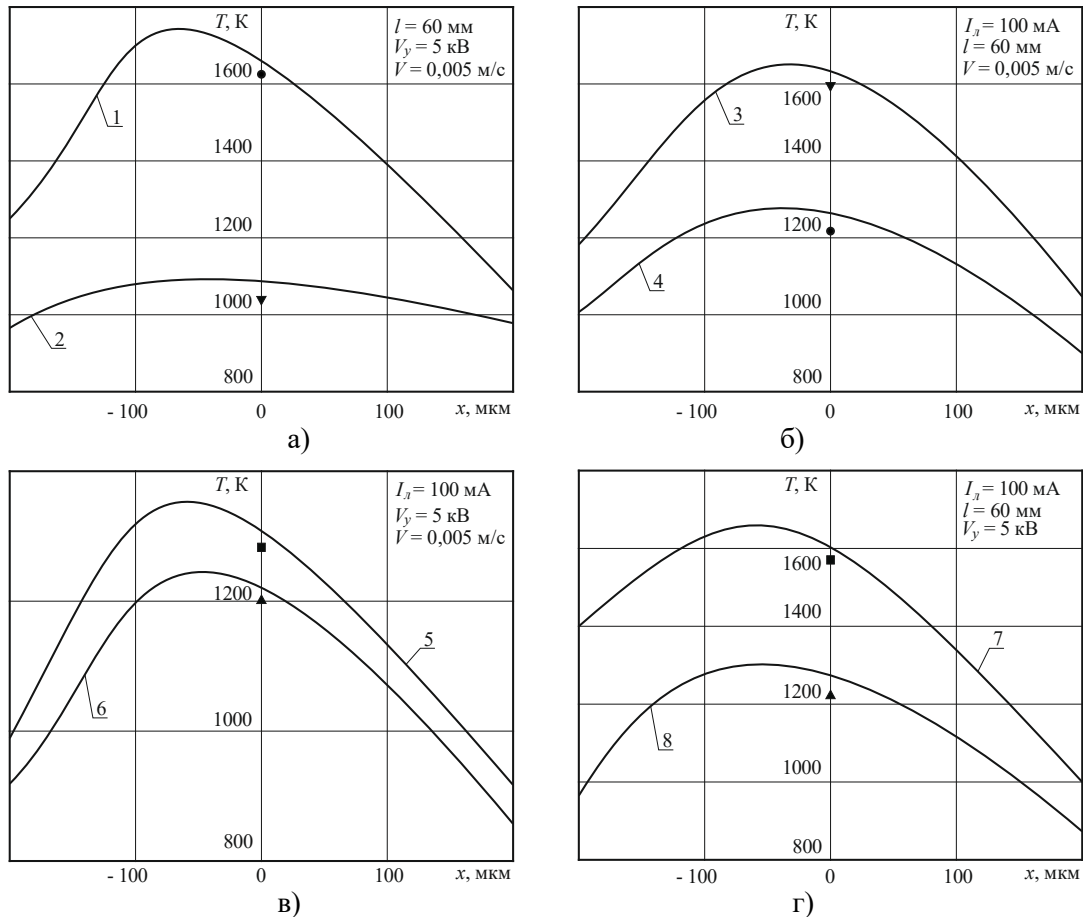
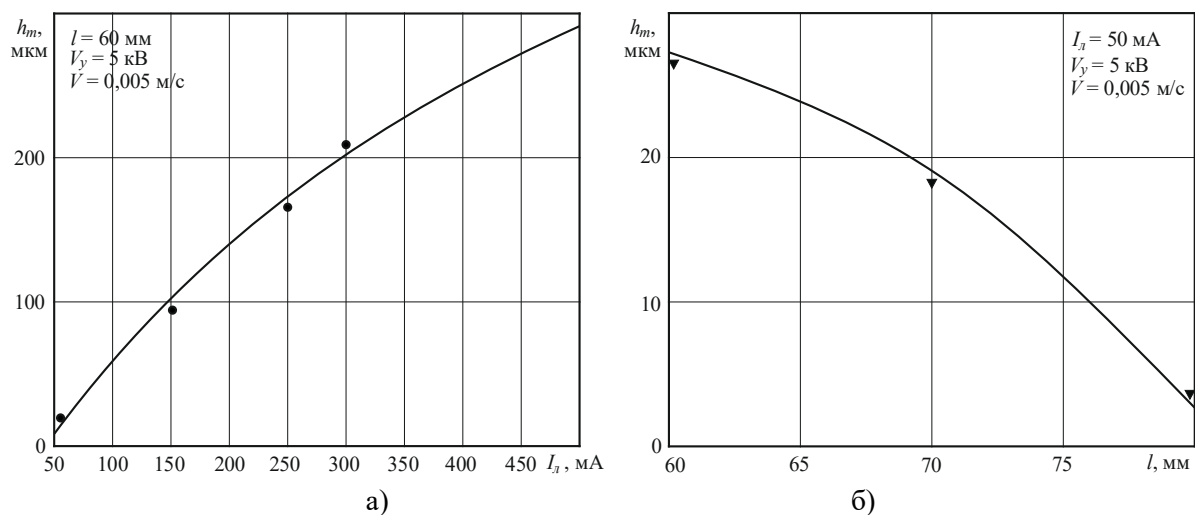


Рисунок 10 – Вплив параметрів СЕП на розподіл температури уздовж оброблюваної поверхні прямокутного елемента ($z = 0$): а) – вплив струму електронного потоку I_n (1 – $I_n = 300$ мА, 2 – $I_n = 50$ мА); б) – вплив прискорювальної напруги V_y (3 – $V_y = 8$ кВ, 4 – $V_y = 4$ кВ); в) – вплив відстані від оброблюваної поверхні l (5 – $l = 60$ мм, 6 – $l = 80$ мм); г) – вплив швидкості переміщення електронного потоку V (7 – $V = 0,002$ м/с, 8 – $V = 0,005$ м/с); ●, ■, ▲, ▼ – експериментальні дані.



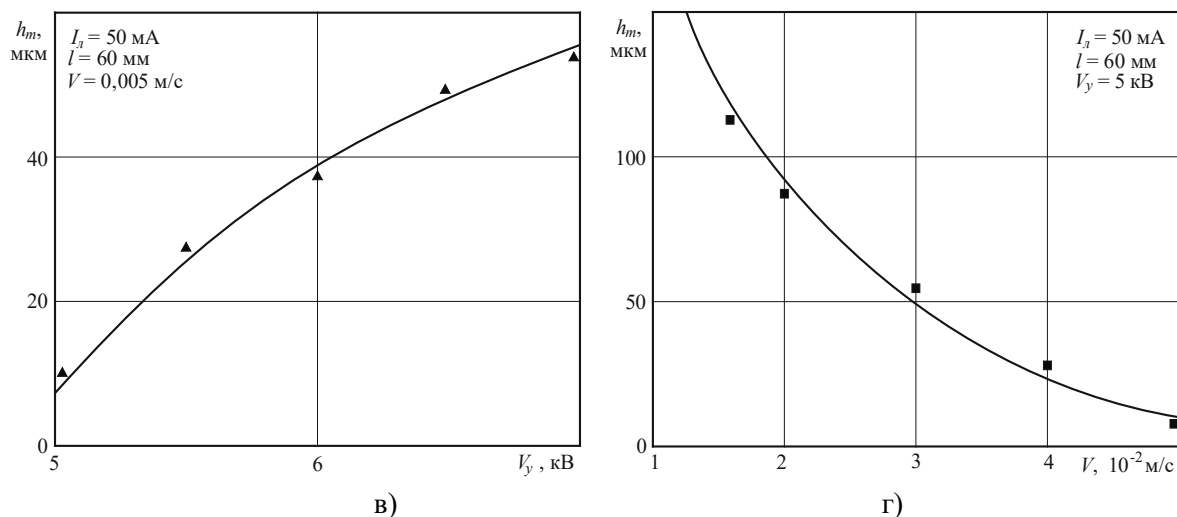


Рисунок 11 – Вплив параметрів СЕП на максимальну товщину оплавленого шару h_m , що утворюється на поверхні прямокутного елемента при його електронній обробці: а) – вплив струму електронного потоку I_a ; б) – вплив відстані від оброблюваної поверхні l ; в) – вплив прискорювальної напруги V_y ; г) – вплив швидкості переміщення електронного потоку V ; \bullet , \blacksquare , \blacktriangle , \blacktriangledown – експериментальні дані.

Висновки. Розроблено та досліджено математичні моделі процесу оплавлення оптичних елементів рухомих СЕП, що враховують, на відміну від існуючих:

– результати зондування СЕП, які зв'язують його енергетичні характеристики (густина теплового впливу, час обробки) з керованими параметрами електронно-променевої установки (струмом променя, прискорювальною напругою, відстанню до оброблюваної поверхні, швидкістю переміщення СЕП);

– режими руху СЕП вздовж поверхні оптичного елемента (багатоцикловий, одноцикловий);

– геометричну форму та розміри елемента, а також температурні залежності теплофізичних властивостей оптичного матеріалу (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності), що дозволяє більш точно розраховувати температурні поля у оптичних елементах;

Проведено розрахунки розподілів температури по товщині оптичних елементів та вздовж їх поверхонь для різних значень керованих параметрів СЕП та визначено допустимі діапазони їх зміни, перевищення яких призводить до погіршення метрологічних характеристик приладів аж до їх відмов.

Інформаційні джерела

1. Ващенко В. А., Яценко І. В., Лега Ю. Г., Кириченко О. В. Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів : монографія. Київ: Наукова думка, 2011. 562 с.
2. Daniel Malacara Handbook of Optical Engineering: handbook. Boca Raton: CRC Press, 2001. 550 p. <https://doi.org/10.1201/9780203908266>
3. ДСТУ ISO 10110-8:2018. Оптика та оптичні прилади. Розроблення креслеників оптичних елементів та систем. Частина 8. Текстура поверхні, шорсткість і хвилястість (ISO 10110-8:2010, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018.
4. Eichmeier, Joseph and Thumm Vacuum electronics: Components and devices: book. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. 552 p. DOI:[10.1007/978-3-540-71929-8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-71929-8)
5. Sun H., Ruan Y., Cao Q., Bai L., Xu J. Efficient large-area polishing of fused silica surfaces based on inductively coupled plasma // Applied Surface Science. 2024. DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.161308.
6. Arun K. Varshneya, Helmut A. Schaeffer Processing, Properties, and Applications of Glass and Optical Materials: book. New Jersey: John Wiley and Sons. Inc., 2012. 254 p. ISBN-10: 1118273745, ISBN-13: 978-1118273746
7. Andrei D. Polyandin and Alexander V. Manzhirov Handbook of Mathematics for Engineers and Scientists: handbook. Boca Raton: Chapman and Hall CRC, 2006. 1543 p. DOI:[10.1201/9781420010510](https://doi.org/10.1201/9781420010510)

8. Marvin J. Weber Handbook of Optical Materials: handbook. Boca Raton, Florida: CRC Press., 2003. 536 p. <https://doi.org/10.1201/9781315219615>
9. Chkhalo N. I., Churin S. A., Mikhaylenko M. S., Pestov A. E., Polkovnikov V. N., Salashchenko N. N., Zorina M. V. Ion-beam polishing of fused silica substrates for imaging soft x-ray and extreme ultraviolet optics // Applied Optics. 2016. Vol. 55, No. 6. P. 1249–1256. DOI: 10.1364/AO.55.001249.
10. Yatsenko I. V., Antonyuk V. S., Vashchenko V. A., Kyrychenko O. V., Tishchenko O. M. Regularities of Influence of Electron-beam Technology Modes on the Performance Characteristics of Optical Elements // J. Nano-Electron. Phys. 2019. Vol. 11, No. 2. P. 02014. DOI: 10.21272/jnep.11(2).02014
11. Yatsenko I. V., Antonyuk V. S., Vashchenko V. A., Gordienko V. I., Kolinko S. O., Butenko T. I. Determination of Optimal Modes of Electron-Beam Micro-Treatment of Surfaces in Optic Elements // J. Nano-Electron. Phys. 2022. Vol. 14, No. 4. P. 04012. DOI: 10.21272/jnep.14(4).04012
12. Effect of ion beam etching on surface/subsurface structural defect evolution in fused silica optics // Optical Materials. 2021. Vol. 116. Art. 111096. DOI: 10.1016/j.optmat.2021.111096.

UDC 621.338.27:537.221

¹Yatsenko I., ²Antonyuk V., ¹Vashchenko V., ¹Kolinko S., ¹Butenko T., ¹Tsybulin V.

¹Cherkasy State Technological University, Ukraine

²National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Ukraine

RESEARCH OF MATHEMATICAL MODELS OF THE FUSION PROCESS OF OPTICAL ELEMENTS OF DEVICES DURING SURFACE ELECTRON BEAM TREATMENT

When processing optical elements with moving band electron flows (BEF), it is of great practical importance to predict optimal values of the liquid bath depth that do not lead to changes in their shape and dimensions. In this regard, the formulation and solution of the problem of mathematical modeling of the melting process of optical materials processed by a moving BEF are relevant. Mathematical models of melting optical elements of devices made of optical glass of grades K8, K108, etc. of various geometric shapes (optical plates, rectangular bars, etc.) and sizes have been developed, taking into account the temperature dependences of the thermo-physical properties of the optical material (volumetric heat capacity, thermal conductivity coefficient), by a moving BEF during multi-cycle and single-cycle processing depending on the set of its parameters (electron flux current, accelerating voltage, distance from the processed surface, electron flux movement speed, and processing time). This allows us to more accurately calculate the temperature distributions along the surface and along the depth of the melt and the maximum thickness of the melted layer of the processed element for different values of the controlled BEF parameters and to determine the permissible ranges of their changes, exceeding which leads to a violation of the flatness of the processed surface of optical elements, a violation of their geometric shape, a deterioration in the metrological characteristics of optical devices and, ultimately, to the failure of devices based on them.

Keywords: electron beam technology, optical glass, band electron flow, methods of thermal conductivity theory.

Дата першого надходження
статті до видання
16.01.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
27.02.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.

**ДО УВАГИ КОРЕСПОНДЕНТІВ!
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ ДО ЗБІРНИКА
«ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ»**

1. Наукова стаття повинна мати наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше питань загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); структурований виклад матеріалів дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; чіткі висновки, які відповідають цілям і стану даного дослідження і перспективи подальшої роботи у даному напрямку.

2. Статтю можна подавати українською або англійською мовами. Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 6.0/7.0 і надрукована тільки на лазерному або струменевому принтері на білих листках формату А4 (290x210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати.

3. Параметри сторінки: ліве – 3 см, верхнє, нижнє, праве поле – 2 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.

4. Шапка статті: індекс УДК, прізвища та ініціали авторів, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по лівому краю. Назва статті розміщується на 1 см нижче назви організації, набирається прописними літерами шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру. Анотація має бути розширеною (об'ємом 1000-1200 знаків), повинні містити короткий виклад статті і розміщуються на 1 см нижче назви статті, набираються з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині. Нижче анотацій вказуються ключові слова. Прізвища та ініціали авторів, назва організації, назва статті, анотація, ключові слова подаються українською та англійською мовами, при чому, анотація мовою статті подається на початку, а прізвище, назва організації, назва статті, анотація, ключові слова іншими двома мовами після інформаційних джерел.

5. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.

6. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифт для формул Symbol; для тексту – Time New Roman Cyr; розмірами: звичайний 12 пт., крупний індекс 7 пт., дрібний індекс 5 пт., крупний символ 18 пт., дрібний символ 12 пт.). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.

7. Наявні ілюстрації розташовувати по тексту, вирівнюючи підписи (Рис. 1. Схема ...) по центру. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі в форматі jpg. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.

8. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (Таблиця 1) – вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці, вирівнюючи по центру.

9. Інформаційні джерела подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами державного стандарту через 1 см від останнього рядка.

10. До статті обов'язково додаються відомості про авторів:

- Прізвище, Ім'я, По батькові;
- Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання;
- Адреса для отримання збірника, e-mail, телефон.
- Заява на ім'я редакції про те, що стаття не є плагіатом і друкується автором вперше.

Основні наукові спеціальності:

G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка;

G6 Інформаційно-вимірювальні технології;

G7 Автоматизація комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка;

Ці спеціальності тісно пов'язані і доповнюють одна одну у сфері таких напрямків: прилади та системи фізичних та біомедичних технологій; прогресивні технологічні процеси в машино- та приладобудуванні; проблеми технологічного менеджменту та сервісного обслуговування медичної техніки; метрологія, інформаційно-вимірювальні технології, стандартизація та сертифікація; проблеми, теорія та практика підготовки фахівців технічного спрямування в контексті євроінтеграції вищої школи України; фізика напівпровідників та

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

діелектриків та фізика твердого тіла; прилади та методи вимірювання електричних, магнітних та механічних величин.

Редакційна колегія збірника забезпечує рецензування наукових статей, що подаються авторами до опублікування. Дотримані всі вимоги до редакційного оформлення наукового видання згідно державних стандартів України.

Статті приймаються в електронному вигляді – за електронною адресою: y.lapchenko@lntu.edu.ua, в письмовому вигляді – за поштовою адресою: 43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, каф. автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, відповідальному редактору В.І. Марчуку постійно протягом року.

Редакція здійснює рецензування статей у такій послідовності:

- Перевірка статті на відповідність вимогам;
- Прийняття рішення щодо прийому статті;
- Інформування авторів про можливість публікації та дозвіл на оплату.

Статті приймаються українською або англійською мовами. Вартість публікації становить **70 грн.** за 1 сторінку.

Реквізити на оплату: Луцький національний технічний університет ЄДРПОУ 05477296 Р/р UA348201720313291011201017820 Призначення платежу: За інформаційно-аналітичне забезпечення наукової діяльності від ППБ.

Квитанцію про сплату надіслати у сканованому вигляді за електронною адресою: y.lapchenko@lntu.edu.ua.

Сайт видання <http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal>

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (наказ МОН України від 22.12.2016 № 1604 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 13 грудня 2016 року»)

Видання має міжнародний стандартний серійний номер ISSN 2313-5352.

Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади» індексується в Google Scholar, Crossref, Scientific Indexing Services у Національній бібліотеці України імені В.І. Вернадського, а також представлено у загальнодержавній технологічній платформі "Наукова періодика України".

Довідки з питань публікації та прийому матеріалів можна отримати у відповідального секретаря – *Лапченка Юрія Сергійовича* за тел. (050) 665-74-01 або за електронною адресою: y.lapchenko@lntu.edu.ua.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

ДЛЯ НОТАТОК

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Відповідальний за випуск Повстяной О. Ю.
Технічний редактор: Пташенчук В. В.
Друкується в авторській редакції

Здано у виробн. 30.05.2026 р.
Формат 60x84/16. Гарнітура Time New Roman. Папір офсетний.
Ум. друк арк. 14. Обл.-вид. арк.12 Тираж 50 пр.

Видавництво «Вежа-Друк»
43021, Україна, м. Луцьк, вул. Шопена 12