

НАУКОВІ ВІСТІ КПІ

Міжнародний науково-технічний журнал

№ 3 (140)

2025

Започаткований у вересні 1997 року

Головний редактор
М. З. Згуровський, акад. НАН України

Заступник головного редактора
М. Ю. Ільченко, акад. НАН України

Відповідальний секретар
П. П. Маслянко, канд. техн. наук, доц.

У номері:

Прикладна математика

Матеріалознавство

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Адреса редакції:
КПІ ім. Ігоря Сікорського
просп. Берестейський, 37
Київ, 03056, Україна

Тел. (+38 044) 204-94-53
E-mail: n.visti@kpi.ua
<http://scinews.kpi.ua>

Засновник – Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Внесений до реєстру суб'єктів у сфері медіа з присвоєнням ідентифікатора медіа R30-02405
(рішення Національної ради з питань телебачення і радіомовлення № 1794 від 21.12.2023)

Згідно з наказами МОН України № 1643 від 28.12.2019, № 409 від 17.03.2020 та № 392 від 05.04.2023 журнал включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України з технічних наук з таких спеціальностей: F1 Прикладна математика, F2 Інженерія програмного забезпечення, F3 Комп'ютерні науки, F7 Комп'ютерна інженерія, F4 Системний аналіз та наука про дані, G9 Прикладна механіка, G8 Матеріалознавство, G11 Машинобудування (за спеціалізаціями), G12 Авіаційна та ракетно-космічна техніка, G3 Електрична інженерія, G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією), G1 Хімічні технології та інженерія, G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка, G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка.

Рекомендовано Вченою радою Національного технічного університету України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, протокол № 9 від 08.09.2025 р.

Члени редакційної колегії

М. І. Бобир,	д-р техн. наук, проф., акад. НАН України
Є. Бондарєв,	PhD, проф., Нідерланди
Х. Валеро,	PhD, проф., Іспанія
І. А. Дичка,	д-р техн. наук, проф., Україна
П. І. Лобода,	д-р техн. наук, проф., акад. НАН України
В. Прівман,	д-р, проф., США
Г. С. Тимчик,	д-р техн. наук, проф., Україна
П. Хенаф,	д-р, проф., Франція
О. Е. Чигиринець,	д-р техн. наук, проф., Україна

Секретар редакції Т. Г. Кулікова

Редактори Н. В. Мурашова, С. Я. Тимчишин

Комп'ютерна верстка Л. М. Котовська, Т. М. Янушевська

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р., просп. Берестейський, 37, Київ, 03056

Підп. до друку 30.09.2025. Формат 60×84¹/₈. Папір офс. Гарнітура UkrainianTimesET.
Спосіб друку – електрографічний. Ум. друк. арк. 8,63. Обл.-вид. арк. 7,01. Наклад 30 пр. Зам. № 25-070.

Видавництво “Політехніка” КПІ ім. Ігоря Сікорського
вул. Політехнічна, 14, корп. 15, Київ, 03056
тел. (044) 204-81-78

KPI SCIENCE NEWS

International research journal

№ 3 (140)

2025

Founded in September, 1997

Editor-in-chief
M. Z. Zgurovsky, Academician of NASU

Deputy editor-in-chief
M. Yu. Ilchenko, Academician of NASU

Executive editor
P. P. Maslyanko, Assoc. Prof., PhD

In the issue:

Applied Mathematics

Materials Science

Automation, Computer-Integrated
Technologies and Robotics

Editorial office:
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
ave. Beresteyskyi, 37,
Kyiv, 03056, Ukraine
E-mail: n.visti@kpi.ua
<http://scinews.kpi.ua>

Founder – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Entered into the register of subjects in the field of media with the assignment of media identifier R30-02405 (decision of the National Council on Television and Radio Broadcasting of Ukraine No. 1794 dated 21.12.2023).

According to the orders of MES of Ukraine from 12.28.2019 no. 1643, from 03.17.2020 no. 409, and from 04.05.2023 no. 392 the journal is included in the «B» category of the List of scientific publications of Ukraine on technical sciences in the following specialties: F1 Applied Mathematics, F2 Software Engineering, F3 Computer Science, F7 Computer Engineering, F4 System Analysis and Data Science, G9 Applied Mechanics, G8 Materials Science, G11 Machinery Engineering (by specializations), G12 Aviation and Aerospace Technologies, G3 Electric Engineering, G4 Energy Production (by specialization), G1 Chemical Technologies and Engineering, G5 Electronics, Electronic Communications, Instrument Making and Radio Engineering, G7 Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics.

Advised by the Academic Council of the National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, protocol No 9 on 08.09.2025.

Editorial Board

Mykola Bobyr,	Prof., Correspondent member of NASU, Ukraine
Egor Bondarau,	Prof., Netherlands
Jose Valero,	Prof., Spain
Ivan Dychka,	Prof., Ukraine
Petro Loboda,	Prof., Academician of NASU, Ukraine
Grygorii Tymchik,	Prof., Ukraine
Patrick Henaff,	Prof., France
Olena Chyhyrynets,	Prof., Ukraine

Editorial secretary T. G. Kulikova

Editors N. V. Murashova, S. Ya. Tymchyshyn

Desktop publishing L. M. Kotovska, T. M. Yanushevka

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Registration Certificate – ДК № 5354 on 25.05.2017, Ave. Beresteiskyi, 37, Kyiv, 03056

Signed for printing on 30.09.2025. Format 60×84¹/₈. Text-weight paper. Font UkrainianTimesET.
Print. tech. – electrographic. Convent. printed sheets 8,63. Published sheets 7,01. Edition of 30 copies. Order No 25-070.

Publishing House “Politehnika”, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Politekhnichna Str., 14, building 15, Kyiv, 03056
Tel.: (044) 204-81-78

ЗМІСТ

Прикладна математика

<i>Полуциганова В.І., Смірнов С.А.</i> Метод уточнення ваг у багатокритеріальній функції корисності в МАУТ	7
<i>Чертюк О.Р., Сахаров С.Ю.</i> Аналіз математичних моделей та методів виявлення змін 3D середовища за зображеннями.....	14
<i>Шьоголев М.О., Циганок В.В.</i> Метод коригування індексу соціальної напруженості на основі методів визначення узгодженості експертних оцінок	32

Матеріалознавство

<i>Педань Р.В., Дубіковський О.В., Боднарук А.В., Круглов І.О., Яворський Ю.В., Владимирський І.А.</i> Структурно-фазові перетворення та магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій на основі Pt/Co, осаджених на гнучкі полімерні підкладки.....	42
<i>Волошко С.М., Бурмак А.П., Ворон М.М., Франчік Н.В., Фурманюк Я.Г.</i> Анізотропія мікроструктури та властивостей SLM-сплаву Inconel 718.....	50

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

<i>Пупена О.М., Клименко О.М., Полупан В.В.</i> Систематизація ключових стандартів для цифрових двійників у промисловому виробництві.....	60
Автори номера.....	74

CONTENTS

Applied Mathematics

<i>Polutsyhanova V.I., Smyrnov S.A.</i> Method for refining weights in multi-criteria utility function in MAUT ...	7
<i>Chertov O.R., Sakharov S.Yu.</i> Analysis of mathematical models and methods for 3D environment change detection from imagery	14
<i>Shchoholiev M.O., Tsyganok V.V.</i> A method for adjusting the social tension index based on methods for assessing the consistency of expert estimates.....	32

Materials Science

<i>Pedan R.V., Dubikovskiy O.V., Bodnaruk A.V., Kruhlov I.O., Yavorskiy Yu.V., Vladymyrskiy I.A.</i> Structural-phase transformations and magnetic properties of Pt/Co-based nanoscale thin film compositions deposited on flexible polymer substrates	42
<i>Voloshko S.M., Burmak A.P., Voron M.M., Franchik N.V., Furmaniuk Ya.H.</i> Anisotropy of microstructure and properties of SLM alloy Inconel 718.....	50

Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics

<i>Pupena O.M., Klymenko O.M., Polupan V.V.</i> Systematization of key standards for digital twins in industrial manufacturing	60
Contributors to the issue	74

DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.328644>
UDC 519.81

V.I. Polutsyhanova*¹, S.A. Smyrnov¹

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Kyiv, Ukraine

*corresponding author: medvika@ukr.net

METHOD FOR REFINING WEIGHTS IN MULTI-CRITERIA UTILITY FUNCTION IN MAUT

Background. In modern multi-criteria decision-making, a critical challenge is the determination of weight coefficients in the utility function. Classical MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) methods often rely on subjective expert evaluations, leading to potential errors due to expert fatigue and the limited number of comparisons. Additionally, discrepancies in the total weight sum can violate the axioms of linear convolution.

Objective. The paper aims to develop a method for refining weight coefficients in the multi-attribute utility function of MAUT, which reduces the influence of subjectivity and ensures analytically consistent values.

Methods. An approach based on the Lagrange method applied to a system of normalised weights is proposed. This method transforms relative (non-normalised) expert assessments into precise weights by solving a system of equations analytically. To minimise errors, only relative weight ratios are used, reducing the number of expert queries from quadratic to linear complexity.

Results. A formula for refining weight coefficients is derived, preserving relative expert evaluations while ensuring accuracy and normalisation. An example involving four criteria demonstrates the use of Lagrange multipliers to achieve refined weights with an error margin below 0.001. The method provides stable and analytically sound results without requiring complete pairwise comparisons.

Conclusions. The proposed method enables efficient refinement of weight coefficients in MAUT without overburdening experts. Analytical computation reduces error risks and enhances decision-making objectivity. The method is suitable for tasks with numerous criteria and offers a robust foundation for constructing utility functions in multi-criteria models.

Keywords: MAUT; utility function; weight coefficients; Lagrange method; expert evaluation; multi-criteria decision-making.

Problem Statement

In the modern world, where decisions often require considering numerous factors, Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) has become a key tool for analysing complex simplex. This theory is an extension of classical utility theory, adapted to tasks where it is necessary to consider not one but multiple criteria simultaneously.

MAUT allows for the formalisation of the decision-making process by combining various aspects of choice into a singular analytical approach. It is based on the principles of rationality and assumes that the preferences of an individual or organisation can be expressed through a function that reflects the degree of satisfaction for each criterion.

The application of Multi-Attribute Utility Theory spans a wide range of fields: from strategic management and planning to environmental policy

and engineering design. This article examines the theoretical foundations of MAUT, methods for its practical application, and its role in improving the quality of decisions in complex multi-criteria tasks. Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) enables the following tasks to be addressed [1]:

- to construct a mathematically justified utility function;
- to verify certain conditions that determine the form of the function in dialogue with the decision-maker (DM);
- to rank all possible alternatives by quality and evaluate them based on the identified decision rule.

The MAUT method is best suited for tasks with a large number of alternatives. Main Stages of the MAUT Method:

Let us outline the stages of solving a problem using Multi-Attribute Utility Theory:

1. To develop a list of criteria.

Пропозиція для цитування цієї статті: В.І. Полудиганова, С.А. Смирнов, «Метод уточнення ваг у багатокритеріальній функції корисності в MAUT», *Наукові вісті КНУ*, № 3, с. 7–13, 2025.
<https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.328644>

Offer a citation for this article: V.I. Polutsyhanova, S.A. Smyrnov, “Method for refining weights in multi-criteria utility function in MAUT”, *KPI Science News*, no. 3, pp. 7–13, 2025.
<https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.328644>

2. To construct a utility function for each criterion.
3. To verify the conditions that determine the general form of the utility function.
4. To establish a relationship between the evaluation of alternatives by criterion and the overall quality of alternatives.
5. Evaluate all available alternatives and select the best one.

According to classical utility theory, Multi-Attribute Utility Theory is based on axiomatic principles. The conditions that a utility function must satisfy are formulated as axioms. If a condition is met, it serves as proof of the existence of the utility function. In MAUT, these conditions can be divided into two groups:

1. General axioms, which are used in utility theory.

2. Independence axioms, specific to MAUT.

In this study, we focused on the axioms of the second group [2].

Main approaches to verifying criteria independence and refining weight coefficients in MAUT

Let us present several independence conditions that belong to the second group of axioms.

1. Difference Independence: Preferences between two alternatives that differ only in their evaluations on an ordinal scale for one criterion C_1 do not depend on the identical evaluations for other criteria C_2, \dots, C_r .

2. Utility Independence: A criterion C_1 is said to be utility independent of criteria C_2, \dots, C_r if the preference order of lotteries, in which only the levels of criterion C_1 vary, does not depend on the fixed values of the other criteria.

3. Preferential Independence: Two criteria C_1 and C_2 are preferentially independent of the other criteria C_3, \dots, C_r if the preferences between alternatives that differ only in their evaluations of C_1 and C_2 do not depend on the fixed values of the other criteria.

The first two independence conditions pertain to the independence of one criterion from others, while the third condition pertains to the independence of several criteria from others.

Main Theorem: If the axioms of the first group and some independence conditions are satisfied, then it strictly follows that a multi-criteria utility function exists in a specific form.

We can formulate R. Keeney's theorem [3], which underlies practical methods for evaluating

alternatives: If the conditions of utility independence and preferential independence are satisfied, then the utility function is additive:

$$U(x) = \sum_{i=1}^N w_i U_i(x),$$

with $\sum_{(i=1)}^N w_i = 1$, or multiplicative:

$$1 + kU(x) = \prod_i (1 + kw_i U_i)$$

with $\sum_{(i=1)}^N w_i \neq 1$, where

- Let U and U_i be utility functions ranging from 0 to 1;

- w_i be the coefficients (weights) of the criteria, where $0 < w_i < 1$;

- and k be a coefficient such that $k > -1$.

Thus, the multi-criteria utility function can be defined if the values of the coefficients w_i and the single-criterion utility functions $U_i(x)$ are known.

Knowing the range of evaluations for each criterion, we construct a function that determines the utility for experts of each evaluation within this range. The maximum value of this function is set to one, and the minimum value to zero. To determine intermediate values, deterministic lotteries are used, depending on the specific task. Examples of their construction are presented in [2].

To determine the overall utility function, it is necessary to verify the conditions of utility independence and preferential independence. The verification of utility independence can be combined with the preliminary stage of constructing single-criterion utility functions.

First, the expert is informed that when determining equivalent values for certainty, they should consider that the other criteria have better values. Then, the expert is presented with the same task but assumes that the other alternative has the worst value (similar to the procedure for verifying utility independence [2, 4]). If the certainty equivalent is the same in both cases, it can be concluded that the given criterion is utility independent of the other criteria.

Note that to fully verify the utility independence condition, this check should be performed for all lotteries. However, it is usually sufficient to perform an approximate check using the first lottery, which is used only during the construction of the single-criterion utility function.

During the verification of the independence condition, the main consideration is to draw a plane along the axis of two evaluated criterion values.

For a complete verification of the preferential independence condition, all pairs of criteria should be considered. However, during an approximate check, one or two of the most important criteria are selected, and the other criteria are considered only in combination with them [2, 5].

Strictly speaking, intermediate values should also be taken into account, but in general, such a check is considered sufficient [2, 6].

MAUT relies largely on the concept of weights (importance coefficients) for criteria. It is assumed that experts can determine the coefficients – numbers that reflect the importance of a criterion. The relationship between the weights of the criteria is established by identifying indifference points on the planes of two criteria. Unlike testing preferences for independence conditions, the axis ranks the criterion values from worst to best.

The main premise on which the classical methods of Keeney [7], Raiffa [3], and Fishburn [8] are based (explicitly or implicitly) is that experts are not mistaken when providing estimates, and the desired utility function should correspond as closely as possible to their estimates. For this purpose, an additive form of the utility function was developed, which is a direct reflection of the independence of the criteria for the case when the sum of the weights is equal to one, as well as a multiplicative form, which is essentially additive, with the counterintuitive occurrence of weight coefficients in the case when their sum is not equal to one. That is, the second case is considered a variant of the norm. This approach solves the problem of constructing the utility function, but it is difficult to consider it consistent. Because the sum of the weight coefficients by definition is equal to one, which is also the basis of the well-known metamodel of multi-criteria decisions – the linear convolution method. It is on this understanding that the intuition of weight coefficients, including among experts, is based. Then the fact of obtaining estimates of weight coefficients whose sum is not equal to one is not fundamental in nature, but is a common consequence of the existence of errors in expert assessment. Usually, experts answer a large number of thematic questions, which leads to their overload and fatigue, and as a result to errors in assessments. Not to mention the fact that infallibility is not inherent in human nature at all, even in the nature of experienced specialists. In this study, we adopt the stance that the multi-criteria utility function, when the criteria are independent, invariably takes an additive form.

In this case, it is not necessary to require experts that the sum of weight coefficients be unity. It is also not necessary to conduct a full set of pairwise comparisons, which will reduce the load on experts to a minimum sufficient: the number of calls drops from $\frac{(n-1)^2}{2}$ to n , which reduces the number of errors both in general and due to fatigue:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n w_i = 1; \\ \sum_{i=1}^n w_i U_i = U. \end{cases}$$

When a problem of adjusting coefficients was solved, we have the opportunity to more accurately and analytically identify the criteria that are important to us and eliminate the subjectivity of experts. The approach described below allows us to obtain refined weight estimates using the Lagrange method and a certain formalised collection of primary information from experts.

Method for refinement of weight estimates for multi-criterion utility function in MAUT

In most cases, when evaluating criteria, an expert can provide a relative assessment of the impact of one alternative more confidently compared to another rather than an absolute one. Therefore, when forming a multi-criteria utility function, we focus on the relationship between the weights (influence) of each utility function. By default, we assume that the expert provides non-normalised estimates [2, 3, 9], meaning the sum of the weights does not equal one. However, these estimates can be adjusted to normalised values through a normalisation procedure. Although Keeney’s theorem allows us to describe the utility function as multiplicative, this introduces more degrees of freedom and, consequently, accumulates errors in various types of evaluations. Therefore, it is desirable to obtain more accurate estimates derived analytically but based on real facts.

Suppose we do not know the exact estimates w_i , but the expert can provide their subjective estimates of the ratio of weights between criteria, i.e., $\frac{w_i}{w_j} \approx a_{ij}$, but $\prod a_{ij} \neq 1$. Our task is to standardise these estimates so that the product equals 1.

Let us present the procedure for transitioning from non-normalised estimates to normalised ones [11]. Suppose our weights are as follows:

$$\begin{cases} \frac{w_i}{w_j} \approx \alpha_{ij}; \\ \prod_{ij} \alpha_{ij} \neq 1; \\ \sum_{i=1}^n w_i \neq 1. \end{cases} \quad (1)$$

To switch from multiplicative form, we need to redefine them like this:

$$\begin{cases} \frac{w_i}{w_j} = \beta_{ij}; \\ \prod_{ij} \beta_{ij} = 1; \\ \sum_{i=1}^n w_i = 1. \end{cases} \quad (2)$$

To find them, we use the least squares method:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n w_i = 1; \\ 0 < w_i < 1; \\ \sum (\frac{w_i}{w_j} - \alpha_{ij})^2 \rightarrow \min. \end{cases}$$

To solve this problem, we use the Lagrange method [10]:

$$L = \sum (\frac{w_i}{w_j} - \alpha_{ij})^2 + \lambda (\sum_{i=1}^n w_i - 1)$$

where L – Lagrange function.

Next, we take the derivatives for each w_i :

$$\frac{\partial L}{\partial w_i} = \sum \frac{\partial L_k}{\partial w_i} + \lambda,$$

where L_k – one of the appendices $(\frac{w_i}{w_j} - \alpha_{ij})^2$.

To further simplify, multiply by the corresponding variable for which we took the derivative:

$$w_i \frac{\partial L}{\partial w_i} = 2 \sum \frac{w_i}{w_j} (\frac{w_i}{w_j} - \alpha_{ij}) + \lambda w_i,$$

where the sum is carried out over the remaining terms of the derivative, and the two appears from the square when taking the derivative.

The general system of partial derivatives will

look like this ($\beta_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n w_i = 1; \\ 0 < w_i < 1; \\ \sum \beta_{ij} (\beta_{ij} - \alpha_{ij}) = \frac{\lambda w_i}{2}. \end{cases}$$

If we sum all the transformed partial derivatives, it turns out that on the left side, all terms cancel each other out due to the alternating signs (pluses and minuses) in the different partial derivatives. On the right side, the sum of the weights appears:

$$\begin{aligned} \Delta I_i &= I_{(-i)} - I = (1 - M_{(-i)}) - \\ &- (1 - M) = M - M_{(-i)}. \end{aligned}$$

From this, it follows that all terms are equal to each other:

$$\beta_{12}(\beta_{12} - \alpha_{12}) = \dots = \beta_{ij}(\beta_{ij} - \alpha_{ij}) = \dots = \beta_{mn}(\beta_{mn} - \alpha_{mn}).$$

Clarification. The indices must be cyclic, not equal to each other, and not symmetric, while covering all possible combinations of the available weights.

From the last equation, we can formulate a parametric quadratic equation for each

$$\begin{aligned} \beta_{ij}(\beta_{ij} - \alpha_{ij}) &= \mu; \\ \beta_{ij}^2 - \beta_{ij}\alpha_{ij} - \mu &= 0; \\ D &= \sqrt{\alpha_{ij}^2 + 4\mu}; \\ \beta_{ij}^{1,2} &= \frac{1}{2}(\sqrt{\alpha_{ij}^2 + 4\mu}). \end{aligned}$$

Two cases are considered:

A. $\prod \alpha_{ij} > 1, \beta_{ij} < \alpha_{ij} \Rightarrow \mu < 0$.

B. $\prod \alpha_{ij} < 1, \beta_{ij} > \alpha_{ij} \Rightarrow \mu > 0$.

In both cases, to solve the quadratic equation, we choose the option with a plus sign, because it will be much closer to α_{ij} than the option with a minus, and by formulating the problem, we try to adjust the available estimates analytically, rather than strictly correcting them.

Than:

$$\prod \beta_{ij} = 1 \Rightarrow \prod (\alpha_{ij} + \sqrt{\alpha_{ij}^2 + 4\mu}) = 2^n, \quad (3)$$

where n – number of factors. The two is obtained from the roots of the quadratic equation with respect to β_{ij} . Knowing β_{ij} we can express w_i :

$$w_i = \frac{1}{1 + \beta_{ij} + \beta_{jk}\beta_{kl} + \dots + \beta_{jk}\beta_{kl}\dots\beta_{vz}},$$

where i, j, \dots, z are all combinations of indices according to the number of weight coefficients.

So, with known a_{ij} , the previous equation, although it turns out to be irrational, is an equation with one variable and can be solved using numerical methods on a computer.

Let's give a small example. Suppose we need to build a multi-criteria utility function consisting of four criteria. Experts can provide us with relative estimates of the ratios for these criteria that satisfy conditions (1).

So it lets:

$$\alpha_{12} = 0,5; \alpha_{23} = 2; \alpha_{34} = 3; \alpha_{41} = 0,4.$$

Then it means:

$$\prod \alpha_{ij} = 1,2.$$

This indicator is close to unity, but not equal to it, so it is necessary to run the procedure for correcting the weight estimates to use the additive loss function in the future.

Let's write a condition for finding normalized estimates:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 w_i = 1; \\ 0 < w_i < 1; \\ (\beta_{12} - \alpha_{12})^2 + (\beta_{23} - \alpha_{23})^2 + (\beta_{34} - \alpha_{34})^2 + (\beta_{41} - \alpha_{41})^2 \rightarrow \min. \end{cases}$$

Let's write the Lagrange equation and substitute a_{ij} :

$$L = (\beta_{12} - 0,5)^2 + (\beta_{23} - 2)^2 + (\beta_{34} - 3)^2 + (\beta_{41} - 0,4)^2 - (w_1 + w_2 + w_3 + w_4).$$

Next, we take the partial derivatives and set them equal to zero:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w_1} = \frac{2}{w_2}(\beta_{12} - 0,5) - \frac{2w_4}{w_1^2}(\beta_{41} - 0,4) - \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial w_2} = \frac{2}{w_3}(\beta_{23} - 2) - \frac{2w_1}{w_2^2}(\beta_{12} - 0,5) - \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial w_3} = \frac{2}{w_4}(\beta_{34} - 3) - \frac{2w_2}{w_3^2}(\beta_{23} - 2) - \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial w_4} = \frac{2}{w_1}(\beta_{41} - 0,4) - \frac{2w_3}{w_4^2}(\beta_{34} - 3) - \lambda = 0. \end{cases}$$

Multiply each equation by the corresponding w_i :

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w_1} \cdot w_1 = \frac{2w_1}{w_2}(\beta_{12} - 0,5) - \frac{2w_4w_1}{w_1^2}(\beta_{41} - 0,4) - \lambda w_1 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial w_2} \cdot w_2 = \frac{2w_2}{w_3}(\beta_{23} - 2) - \frac{2w_1w_2}{w_2^2}(\beta_{12} - 0,5) - \lambda w_2 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial w_3} \cdot w_3 = \frac{2w_3}{w_4}(\beta_{34} - 3) - \frac{2w_2w_3}{w_3^2}(\beta_{23} - 2) - \lambda w_3 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial w_4} \cdot w_4 = \frac{2w_4}{w_1}(\beta_{41} - 0,4) - \frac{2w_3w_4}{w_4^2}(\beta_{34} - 3) - \lambda w_4 = 0. \end{cases}$$

We sum the equations and get:

$$-\frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^n w_i = 0.$$

Which was to be proved.

So, we can use the results obtained in the general case (3):

$$\prod (\alpha_{ij} + \sqrt{\alpha_{ij}^2 + 4\mu}) = 2^n;$$

$$(0,5 + \sqrt{0,5^2 + 4\mu})(2 + \sqrt{2^2 + 4\mu})(3 + \sqrt{3^2 + 4\mu}) \times (0,4 + \sqrt{0,4^2 + 4\mu}) = 16.$$

Using numerical methods and with the help of a computer, we obtain approximate values of μ . Of all the values found, $\mu = -0.015$ suits us, because the others have positive values, and according to condition (2), we need negative values.

So, the values of β_{ij} have the following values:

$$\beta_{12} = \frac{0,5 + \sqrt{0,5^2 + 4\mu}}{2}; \beta_{23} = \frac{2 + \sqrt{2^2 + 4\mu}}{2};$$

$$\beta_{34} = \frac{3 + \sqrt{3^2 + 4\mu}}{2}; \beta_{41} = \frac{0,4 + \sqrt{0,4^2 + 4\mu}}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \beta_{12} = 0,53; \beta_{23} = 2,01; \beta_{34} = 3,005; \beta_{41} = 0,43.$$

Next, from the system of equations we find the normalized values of w_i :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 w_i = 1; \\ w_1 = 0,53w_2; \\ w_2 = 2,01w_3; \\ w_3 = 3,005w_4; \\ w_4 = 0,43w_1. \end{cases}$$

We solve the system and get:

$$w_1 = 0,217; w_2 = 0,409; w_3 = 0,093; w_4 = 0,2805.$$

The weights are rounded to the third sign, since there are irrational solutions.

Based on the obtained weights, we have the general form of the loss function for these estimates:

$$U = 0,217U_1 + 0,409U_2 + 0,093U_3 + 0,2805U_4.$$

Further, based on the utility functions for each alternative, we can obtain an analytical estimate of the total utility from this combination of utility functions.

Conclusions

Existing methods in the field of multi-attribute utility theory (MAUT) often rely on subjective expert judgments and complete pairwise comparisons to determine weight coefficients, which results in increased cognitive load and a high risk of inconsistency. While previous research has proposed heuristic or numerical approaches to mitigate expert errors, these methods typically lack mathematical rigor and offer limited analytical transparency.

This study presents a novel analytical solution based on the Lagrange method for refining weight coefficients in MAUT. Unlike conventional techniques, the proposed method maintains the relative

importance assigned by experts while transforming it into a normalized and consistent form. A significant advantage of this approach lies in its reduction of the required number of expert inputs from quadratic to linear scale, which minimizes cognitive fatigue and enhances the practicality of expert-based decision models. Moreover, the method produces mathematically grounded results with high stability and repeatability, making it suitable for applications in strategic planning, public administration, technical systems design, and other domains involving complex multi-criteria evaluations.

The proposed technique opens the door to further developments, such as the integration of fuzzy or linguistic inputs and the extension to nonlinear or group-based decision-making models. Future research could focus on the incorporation of probabilistic or Bayesian mechanisms for collective expert input refinement, as well as on the development of software tools to support practical implementation in decision support systems. These enhancements would further expand the applicability and robustness of the method in real-world environments characterized by uncertainty and complexity.

References

- [1] S.J.T. Jansen, "The Multi-attribute Utility Method", in *The Measurement and Analysis of Housing Preference and Choice*. Dordrecht: Springer Neth., 2011, pp. 101–125. Accessed: Apr. 10, 2024. [Online]. Retrieved from: https://doi.org/10.1007/978-90-481-8894-9_5.
- [2] O. Bozorg-Haddad, B. Zolghadr-Asli, and H.A. Loáiciga, *Handbook on Multi-Attribute Decision-Making Methods*. Wiley Sons, Inc., John, 2021.
- [3] H. Raiffa and R.L. Keeney, *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*. Cambridge Univ. Press, 2014.
- [4] M.Z. Zgurovsky, A.A. Pavlov, and A.S.Sh. Shtankevych, *Modified method of hierarchy analysis*, System Research and Information Technologies, no. 1, pp. 7–25, 2010.
- [5] A.A. Pavlov, E.I. Lyschuk, V.I. Angle, *Mathematical optimization models for substantiation and finding weights of objects in the pairwise comparison method*, System Research and Information Technologies, no. , pp. 13–21, 2010.
- [6] J. Jia, G.W. Fischer, and J.S. Dyer, "Attribute weighting methods and decision quality in the presence of response error: a simulation study", *J. Behav. Decis. Making*, vol. 11, no. 2, pp. 85–105, Jun. 1998. Accessed: Apr. 10, 2025. [Online]. Retrieved from: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-0771\(199806\)11:2%3C85::aid-bdm282%3E3.0.co;2-k](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-0771(199806)11:2%3C85::aid-bdm282%3E3.0.co;2-k).
- [7] P.C. Fishburn and R.L. Keeney, "Generalized Utility Independence and Some Implications", *Operations Res.*, vol. 23, no. 5, pp. 928–940, Oct. 1975. Accessed: Apr. 10, 2025. [Online]. Retrieved from: <https://doi.org/10.1287/opre.23.5.928>.
- [8] P.C. Fishburn, F.K. Hwang, and H. Lee, "Do local majorities force a global majority?", *Discrete Math.*, vol. 61, no. 2-3, pp. 165–179, Sep. 1986. Accessed: Apr. 10, 2025. [Online]. Retrieved from: [https://doi.org/10.1016/0012-365x\(86\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0012-365x(86)90088-9).
- [9] T.L. Saaty, "Group Decision Making and the AHP", in *The Analytic Hierarchy Process*. Berlin, Heidelberg: Springer Berl. Heidelb., 1989, pp. 59–67. Accessed: Apr. 10, 2025. [Online]. Retrieved from: https://doi.org/10.1007/978-3-642-50244-6_4
- [10] D.P. Bertsekas, *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*. Academic Press, 1982 (reprint 2014). [Online]. Retrieved from: https://books.google.com/books/about/Constrained_Optimization_and_Lagrange_Mu.html?id=-j6LiBQAAQBAJG.
- [11] V.I. Polutsyanova and S.A. Smyrnov, "Robasic method for estimating travel coefficients for MAUT," in *Inform. technologies and safety*, Kiev, Ukraine, 30 sheets. 2023. Kiev: IN-T PROBLEMS OF INFORMATION REGISTRATION NAS UKRAINE, 2023, p. 50–54.

В.І. Полуциганова¹, С.А. Смирнов¹

МЕТОД УТОЧНЕННЯ ВАГ У БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНІЙ ФУНКЦІЇ КОРИСНОСТІ В MAUT

Проблематика. У задачах прийняття рішень (ПР) критичним моментом є визначення вагових коефіцієнтів у багатокритеріальній функції корисності. Класичні методи MAUT (багатокритеріальної теорії корисності) спираються на суб'єктивні оцінки експертів і не є стійкими до помилок через їх перевантаження і втому. Крім того, відхилення суми ваг надмірно впливає на значення й вигляд функції корисності.

Мета дослідження. Розробити метод уточнення оцінок значень вагових коефіцієнтів у багатокритеріальній функції корисності MAUT, що забезпечує їх аналітичну узгодженість і зменшує вплив помилок експертів.

Методика реалізації. Запропоновано підхід, оснований на МНК, застосовний до системи нормалізованих ваг. Цей метод перетворює експертні оцінки відношень ваг на нормалізовані ваги шляхом аналітичного розв'язання системи рівнянь. Для зменшення помилок використано мінімальний набір відношень ваг, що мінімізує потрібну кількість експертних оцінок.

Результати дослідження. Формула для вагових коефіцієнтів на основі експертних оцінок їх відношень забезпечує найкращу точність і нормалізацію. Приклад із чотирма критеріями використовує метод множників Лагранжа для знаходження ваг із похибкою менше 0,001. Метод забезпечує стабільні та аналітично обґрунтовані результати за мінімальною кількістю попарних порівнянь.

Висновки. Запропонований метод дозволяє ефективно знаходити вагові коефіцієнти MAUT з мінімальним навантаженням експертів. Результати зменшують вплив суб'єктивних помилок і підвищують якість прийняття рішень. Метод підходить для задач ПР з кількісними критеріями і пропонує надійну основу для побудови узагальненого критерію.

Ключові слова: MAUT; функція корисності; вагові коефіцієнти; метод Лагранжа; експертне оцінювання; багатокритеріальне прийняття рішень.

Рекомендована Радою
навчально-наукового фізико-технічного інституту
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
5 травня 2025 року

Прийнята до публікації
08 вересня 2025 року

DOI: <https://doi.org/10.20535/kpispn.2025.3.336383>

УДК 004.932:528.85:519.6

О.Р. Чертов¹, С.Ю. Сахаров^{*}

¹ КПП ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

^{*}Відповідальний автор: sakharov.serhii@iill.kpi.ua

АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ ЗМІН 3D-СЕРЕДОВИЩА ЗА ЗОБРАЖЕННЯМИ

Проблематика. Автоматизоване виявлення змін у тривимірному (3D) середовищі є критично важливою задачею для створення та підтримки цифрових двійників міської інфраструктури, екологічного моніторингу та забезпечення безпеки об'єктів. Відомі методи часто не враховують невизначеність вимірювань, погано масштабуються на великі обсяги даних і не інтегрують семантичну інформацію. Наявні огляди зосереджуються переважно на технічних аспектах або конкретних застосуваннях, недостатньо повно висвітлюючи особливості математичних методів, що використовуються. Це ускладнює вибір оптимальних алгоритмів для актуалізації цифрових двійників середовища.

Мета дослідження. Систематизація та порівняльний аналіз математичних моделей і методів виявлення змін у тривимірних даних середовища. Формування таксономії методів з визначенням їх переваг, обмежень та областей застосування. Розроблення рекомендацій щодо вибору оптимальних підходів для різних типів задач моніторингу 3D-середовища.

Методика реалізації. Систематичний аналіз класичних геометричних методів реєстрації та порівняння хмар точок, статистичних підходів для оцінювання невизначеності вимірювань і сучасних методів машинного навчання для автоматичної класифікації змін. Формалізація математичних моделей подання 3D-даних, типів змін і метрик їх оцінювання.

Результати дослідження. Розроблено уніфіковану математичну модель для опису різних типів змін у 3D-середовищі, що є основою для автоматизованої актуалізації цифрових двійників. Визначено критерії вибору відповідних методів залежно від характеристик даних і вимог застосування. Показано, що гібридні підходи, які поєднують геометричні методи з машинним навчанням, забезпечують найкращу точність під час збереження інтерпретованості результатів для оновлення цифрових моделей середовища.

Висновки. Запропонована систематизація дозволяє обґрунтовано вибирати методи для конкретних задач виявлення змін. Перспективними напрямками є розроблення адаптивних алгоритмів з автоматичним налаштуванням параметрів та інтеграція семантичної інформації через сучасні архітектури глибокого навчання.

Ключові слова: зміни 3D-середовища; хмари точок; цифровий двійник; комп'ютерний зір; машинне навчання.

Вступ

Виявлення змін у 3D-середовищі становить фундаментальну задачу сучасного геопросторового аналізу, яка набуває критичної важливості у контексті розвитку концепції цифрових двійників і систем моніторингу динамічних середовищ. Розв'язання цієї задачі є невід'ємною складовою підтримки актуального стану цифрового двійника середовища і дослідження еволюції окремих його ділянок, забезпечуючи можливість кількісної оцінки

просторово-часових трансформацій з потрібною точністю.

Автоматизоване виявлення подібних змін має широкий спектр застосувань: від контролю несанкціонованої забудови і моніторингу критичної інфраструктури до оцінювання екологічних процесів і наслідків техногенних катастроф. Сучасні технології тривимірного сканування генерують величезні обсяги просторових даних, проте сама по собі доступність даних не вирішує складної задачі автоматизованого виявлення і класифікації змін, яка вимагає роз-

Пропозиція для цитування цієї статті: О.Р. Чертов, С.Ю. Сахаров, “Аналіз математичних моделей і методів виявлення змін 3D-середовища за зображеннями”, *Наукові вісті КПП*, № 3, с. 14–31, 2025. doi: <https://doi.org/10.20535/kpispn.2025.3.336383>

Offer a citation for this article: O.R. Chertov, S.Yu. Sakharov, “Analysis of mathematical models and methods for 3D environment change detection from imagery”, *KPI Science News*, no. 3, pp. 14–31, 2025. doi: <https://doi.org/10.20535/kpispn.2025.3.336383>

робки спеціалізованих математичних моделей та обчислювальних методів.

Історично перші підходи ґрунтувалися на простому геометричному порівнянні хмар точок, але виявилися надто чутливими до шуму й похибок реєстрації. З розвитком статистичної теорії обробки даних з'явилися методи, що явно враховують невизначеність вимірювань, серед яких метод M3C2 [1] став фактичним стандартом для наукових досліджень. Останнє десятиліття ознаменувалося революцією у застосуванні глибинного навчання – архітектури PointNet [2], DGCNN [3], Siamese KPConv [4] продемонстрували здатність автоматично видобувати семантично значущі ознаки з неструктурованих хмар точок.

Попри значний інтерес дослідницької спільноти наявні огляди літератури мають суттєві обмеження. Stilla and Xu (2023) [5] детально проаналізували джерела даних і практичні аспекти, але приділили недостатню увагу математичним основам алгоритмів. Shafique et al. (2022) [6] зосередилися на методах глибинного навчання, обмежившись переважно двовимірними (2D) зображеннями. Qin et al. (2016) [7] надали піонерську роботу із 3D виявлення змін, але з того часу з'явилося багато нових методів, які потребують систематизації. Kharroubi et al. (2022) [8] провели технічний огляд рівнів обробки, не розкривши математичні моделі. Andresen and Schultz-Fellenz (2023) [9] надали огляд застосувань безекіпажних авіаційних систем (unoccupied aerial systems, UAS) для виявлення змін у 3D-середовищах, акцентуючи увагу на технологічних аспектах збору даних і практичних застосуваннях, але також не заглиблюючись у математичні основи методів обробки. Спільною рисою цих оглядів є недостатня увага до математичних моделей і методів, покладених в основу відомих рішень.

Пропонована робота спрямована на заповнення виявленої прогалини шляхом систематичного аналізу математичного апарату методів виявлення змін у 3D-середовищі. Основні цілі включають формалізацію математичних моделей подання даних і типології змін у тривимірному середовищі, аналіз метрик для кількісної оцінки, дослідження задачі реєстрації як оптимізаційної проблеми, порівняння теоретичних властивостей різних категорій методів і визначення критеріїв вибору оптимальних підходів.

Стаття організована таким чином. Розділ 1 подає математичне формулювання задачі,

включаючи формальні визначення й основні метрики. Розділ 2 розглядає задачу реєстрації хмар точок як критичну передумову виявлення змін. Розділ 3 систематизує методи безпосереднього виявлення змін у трьох категоріях: геометричні, на основі сегментації та імовірнісні. Розділ 4 аналізує сучасні методи машинного навчання в контексті розглядуваної задачі. Розділ 5 надає практичні аспекти та експериментальні результати. У висновках підсумовано поточні досягнення й окреслено перспективи майбутніх досліджень.

Постановка задачі

Мета цієї роботи – систематизувати наявні математичні моделі й методи виявлення змін у 3D-середовищі на основі зображень, отриманих у різні моменти часу.

Комплексний аналіз відомих оглядових робіт [5–9] дозволив виявити загальну структуру процесу виявлення змін у тривимірному середовищі за зображеннями. Незалежно від конкретної реалізації та сфери застосування більшість методів дотримуються подібної послідовності етапів обробки даних, що відображає фундаментальну природу задачі.

На рис. 1 зображено узагальнену модель виявлення змін у 3D-середовищі, яка складається з шести основних етапів. Вхідними даними є зображення, отримані в різні моменти часу t та $t + 1$, які можуть походити з різних джерел: аерофотозйомка, супутникові знімки, наземна фотограмметрія або комбінація цих методів. Першим критичним етапом є генерація тривимірних хмар точок із цих зображень за допомогою фотограмметричних методів, зокрема Structure-from-Motion (SfM) для розрідженої реконструкції та Multi-View Stereo (MVS) для отримання щільних хмар точок.

Отримані хмари точок зазвичай містять шум, викиди й систематичні похибки, тому наступним необхідним кроком є попередня обробка даних. Вона включає геометричну корекцію і калібрування для усунення систематичних спотворень, статистичну фільтрацію для видалення точок шуму й викидів, а також нормалізацію даних для забезпечення порівнянності хмар різних епох.

Центральним етапом всього процесу є реєстрація хмар точок – зведення їх до спільної системи координат. Цей етап традиційно поділяють на два підетапи: груба реєстрація, яка використовує методи на основі ознак (FPFH,

SHOT) або геометричних примітивів (4PCS), і точна реєстрація, що застосовує ітеративні алгоритми типу ICP або Point-to-Plane для остаточного вирівнювання.

Після успішної реєстрації виконують безпосереднє виявлення змін, для чого застосовують різні категорії методів: прямі методи порівняння відстаней, методи на основі сегментації об'єктів, імовірнісні підходи з оцінкою невизначеності та сучасні методи глибинного навчання. Завершальним етапом є аналіз виявлених змін, що включає їх класифікацію за типами (геометричні, топологічні, семантичні) й оцінку статистичної значущості з урахуванням невизначеності вимірювань.

Важливо зазначити, що у межах цієї роботи ми зосереджуємося виключно на методах обробки вже наявних тривимірних хмар точок.

Методи генерації хмар точок із зображень, хоча й є критично важливими для загального процесу, виходять за межі нашого дослідження. Фотограмметричні методи реконструкції, включаючи Structure-from-Motion, Multi-View Stereo та їх варіанти, розглядаються у спеціалізованих оглядах, наприклад у [10]. Ці методи становлять окрему велику сферу досліджень із власними викликами та рішеннями, які потребують окремого детального розгляду.

Таке обмеження дозволяє нам сконцентруватися на математичних аспектах власне виявлення змін, припускаючи, що вхідні хмари точок вже отримані з достатньою якістю і щільністю. Це дає можливість глибше проаналізувати методи реєстрації, порівняння і класифікації змін, які є ядром задачі моніторингу динаміки тривимірного середовища.

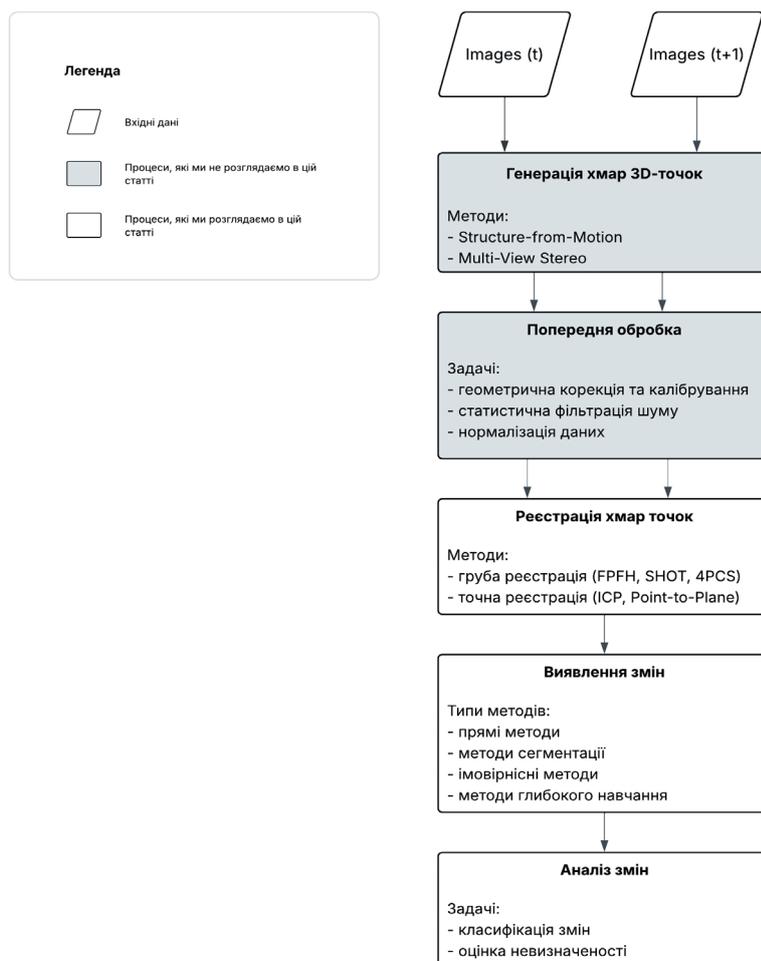


Рис. 1. Узагальнена модель виявлення змін у 3D-середовищі за зображеннями. Модель ілюструє послідовність етапів від вхідних зображень різних епох до кінцевого аналізу змін. На діаграмі позначено як етапи, що є предметом розгляду у цій статті (реєстрація хмар точок, виявлення та аналіз змін), так і ті, що залишаються поза її межами (генерація хмар точок, попередня обробка)

1. Математичне формулювання задачі

1.1. Формальні визначення

Виявлення змін у тривимірному середовищі є фундаментальною задачею комп'ютерного зору та дистанційного зондування, яка полягає у визначенні та аналізі відмінностей між станами об'єктів або сцен, зафіксованих у різні моменти часу. Для формального опису цієї задачі введемо потрібні математичні визначення й позначення.

Нехай $S \subset R^3$ позначає тривимірну сцену в евклідовому просторі. На практиці ми не маємо безпосереднього доступу до неперервної геометрії S , а працюємо з її дискретними поданнями, отриманими за допомогою різних сенсорів. *Хмарою точок* називають скінченну множину точок у тривимірному просторі:

$$P = \{p_i \in R^3 : i = 1, \dots, n\},$$

де n – кількість точок у хмарі. Кожна точка є дискретною вибіркою поверхні об'єктів у сцені. Додатково точки можуть мати асоційовані атрибути:

$$p_i^{ext} = (x_i, y_i, z_i, a_i^1, \dots, a_i^k)^T,$$

де a_i^j – атрибути, такі як інтенсивність відбиття, колір RGB, нормаль до поверхні тощо.

Нехай t_1, t_2, \dots, t_m – дискретні моменти часу. *Часовою послідовністю* хмар точок називають впорядковану множину

$$P = \{P^{(t_1)}, P^{(t_2)}, \dots, P^{(t_m)}\},$$

де $P^{(t_j)}$ – хмара точок, отримана в момент часу t_j .

Для двох хмар точок $P^{(t_1)}$ та $P^{(t_2)}$, отриманих у моменти часу $t_1 < t_2$, задача виявлення змін полягає у знаходженні функції

$$\Delta : P^{(t_1)} \times P^{(t_2)} \rightarrow C,$$

де C – простір можливих змін.

Геометричною зміною між двома хмарами точок $P^{(t_1)}$ та $P^{(t_2)}$ називають множину

$$\Delta_g = \{(p, q, d) : p \in P^{(t_1)}, q \in P^{(t_2)}, d = \|p - T(q)\| > \tau\},$$

де $T : R^3 \rightarrow R^3$ – оптимальна трансформація вирівнювання; τ – поріг виявлення змін.

Типологія змін. Типи можливих змін у тривимірному середовищі вже були виділені раніше [5]. Утім, ми дамо їм уніфіковані строгі математичні визначення.

Об'єкт вважають таким, що *з'явився*, якщо існує зв'язна підмножина $Q \subset P^{(t_2)}$, для якої

$$\forall q \in Q : \min_{p \in P^{(t_1)}} \|p - q\| > \tau_{appear}.$$

Об'єкт вважають таким, що *зник*, якщо існує зв'язна підмножина $R \subset P^{(t_1)}$, для якої

$$\forall r \in R : \min_{q \in P^{(t_2)}} \|r - q\| > \tau_{disappear}.$$

Деформацією називають зміну, за якої об'єкт зберігає топологічну зв'язність, але змінює свою геометричну форму. Формально для підмножин $R \subset P^{(t_1)}$ та $Q \subset P^{(t_2)}$, що є одним об'єктом, існує гомеоморфна відповідність $f : R \rightarrow Q$, при цьому для деяких елементів $r \in R$:

$$\|f(r) - r\| > \tau_{deform}.$$

Зміщенням об'єкта називають його переміщення як жорсткого тіла:

$$Q = \{T_{rigid}(r) : r \in R\},$$

де T_{rigid} – жорстке перетворення (композиція обертання і зсуву).

Математична модель невизначеності. Оскільки вимірювання реальних сцен завжди містять похибки, слід враховувати невизначеність у наших моделях. Кожну виміряну точку p_i моделюють як

$$p_i = p_i^{true} + \varepsilon_i,$$

де p_i^{true} – справжнє положення точки; $\varepsilon_i \sim N(0, \Sigma_i)$ – випадковий шум з коваріаційною матрицею Σ_i .

Простір ознак для виявлення змін. Для ефективного виявлення змін точки часто характеризують не лише їх положенням у просторі, але й додатковими ознаками (наприклад, нормаль до поверхні та кривизни, гістограми орієнтацій тощо). *Локальним дескриптором точки* p_i називають вектор ознак

$$\mathbf{f}_i = \phi(p_i, N(p_i)) \in R^d,$$

де $N(p_i) = \{p_j : \|p_i - p_j\| < r\}$ – локальний окіл точки радіуса r ; ϕ – функція видобування ознак.

1.2. Метрики та міри відстані

Центральним елементом задачі виявлення змін є вибір відповідної метрики для кількісної оцінки відмінностей між хмарами точок. Різні метрики мають свої переваги та обмеження залежно від характеру даних і типу змін, які треба виявити.

Відстань Хаусдорфа

Класичною метрикою для порівняння геометричних множин є відстань Хаусдорфа, яка вимірює максимальну відстань від точок однієї множини до найближчої точки іншої множини.

Визначення 1.2.1 (односпрямована відстань Хаусдорфа). Для двох непорожніх підмножин $P, Q \subset \mathbb{R}^3$ односпрямовану відстань Хаусдорфа від P до Q визначають як

$$h(P, Q) = \max_{p \in P} \min_{q \in Q} \|p - q\|.$$

Визначення 1.2.2 (відстань Хаусдорфа). Відстань Хаусдорфа між множинами P та Q є максимумом двох односпрямованих відстаней:

$$H(P, Q) = \max \{h(P, Q), h(Q, P)\}.$$

Відстань Хаусдорфа чутлива до викидів, оскільки визначається найгіршим випадком. Для практичних застосувань часто використовують модифіковані версії.

Визначення 1.2.3 (усічена відстань Хаусдорфа). Усічену відстань Хаусдорфа на рівні $\alpha \in (0, 1)$ визначають як

$$H_\alpha(P, Q) = \max \{h_\alpha(P, Q), h_\alpha(Q, P)\},$$

де $h_\alpha(P, Q)$ – це α -квантиль розподілу відстаней $\{\min_{q \in Q} \|p - q\| : p \in P\}$.

Статистичні міри відстані

Для стійкого виявлення змін за наявності шуму і неповних даних використовують статистичні міри.

Визначення 1.2.4 (середньоквадратична відстань). Середньоквадратичну відстань між хмарами точок P та Q визначають як

$$d_{RMS}(P, Q) = \sqrt{\frac{1}{|P|} \sum_{p \in P} \min_{q \in Q} \|p - q\|^2}.$$

Визначення 1.2.5 (відстань Chamfer). Симетрична відстань Chamfer між хмарами точок P та Q [11]

$$d_{Chamfer}(P, Q) = \frac{1}{|P|} \sum_{p \in P} \min_{q \in Q} \|p - q\|^2 + \frac{1}{|Q|} \sum_{q \in Q} \min_{p \in P} \|q - p\|^2.$$

Метрика МЗС2

Для врахування локальної геометрії поверхні та невизначеності вимірювань розроблено метрику Multiscale Model to Model Cloud Comparison (МЗС2) [1].

Визначення 1.2.6 (МЗС2-відстань). Для точки $p_i \in P^{(t_1)}$ з нормаллю \mathbf{n}_i МЗС2-відстань визначають як

$$d_{M3C2}(p_i) = \frac{1}{|N_2|} \sum_{q \in N_2} (\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{q}) - \frac{1}{|N_1|} \sum_{p \in N_1} (\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{p}),$$

де $N_1 \subset P^{(t_1)}$ та $N_2 \subset P^{(t_2)}$ – локальні околиці радіуса r навколо проекції P_i уздовж нормалі.

Визначення 1.2.7 (довірчий інтервал МЗС2). Статистичну значущість зміни оцінюють через довірчий інтервал

$$LOD_{95\%}(d) = \pm 1.96 \left(\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2} + \sigma_{reg}} \right),$$

де σ_1, σ_2 – стандартні відхилення точок у локальних околицях; n_1, n_2 – кількість точок; σ_{reg} – похибка реєстрації.

Воксельні метрики

Для ефективної обробки великих хмар точок використовують воксельні подання [12].

Визначення 1.2.8 (воксельна сітка). Воксельна сітка – це розбиття простору \mathbb{R}^3 на кубічні комірки розміру Δ :

$$V_{ijk} = [i\Delta, (i+1)\Delta) \times [j\Delta, (j+1)\Delta) \times [k\Delta, (k+1)\Delta).$$

Визначення 1.2.9 (воксельна відстань).

Для воксельних подань \mathcal{V}_P та \mathcal{V}_Q хмар точок P та Q

$$d_{\text{voxel}}(P, Q) = \sum_{ijk} |o_{ijk}^P - o_{ijk}^Q|,$$

де $o_{ijk} \in \{0, 1\}$ – індикатор зайнятості вокселя.

Спектральні відстані

Для аналізу глобальних властивостей форми використовують спектральні методи [13].

Визначення 1.2.10 (спектральна відстань).

Нехай $\lambda_1^P \leq \lambda_2^P \leq \dots \leq \lambda_k^P$ та $\lambda_1^Q \leq \lambda_2^Q \leq \dots \leq \lambda_k^Q$ – власні значення матриць Лапласа графів хмар точок P та Q . Спектральну відстань визначають як

$$d_{\text{spectral}}(P, Q) = \sqrt{\sum_{i=1}^k (\lambda_i^P - \lambda_i^Q)^2}.$$

Вибір метрики

Вибір відповідної метрики залежить від характеристик даних і розв'язуваних задач:

- **відстань Хаусдорфа** – для оцінювання найгіршого випадку деформацій;
- **відстань Chamfer** – для глобального порівняння з урахуванням усіх точок;
- **МЗС2** – для виявлення змін з оцінюванням статистичної значущості;
- **воксельні метрики** – для швидкої обробки великих масивів даних;
- **спектральні відстані** – для порівняння глобальної структури.

2. Задача реєстрації як оптимізація

Реєстрація хмар точок є фундаментальною передумовою для виявлення змін, оскільки порівняння можливе лише у разі правильного суміщення даних різних епох. Задача реєстрації полягає у знаходженні оптимального перетворення, яке вирівнює дві або більше хмар точок у спільній системі координат [14].

2.1. Постановка задачі

Нехай маємо дві хмари точок: вихідну (source) $P = \{p_i \in R^3 : i = 1, \dots, n_p\}$ і цільову (target) $Q = \{q_j \in R^3 : j = 1, \dots, n_q\}$. Задача реєстрації по-

лягає у знаходженні перетворення $T : R^3 \rightarrow R^3$, яке оптимально вирівнює P відносно Q [15].

Визначення 2.1.1 (жорстке перетворення).

Жорстке перетворення визначають як

$$T(p) = Rp + t,$$

де $R \in SO(3)$ – матриця обертання; $t \in R^3$ – вектор зсуву.

Визначення 2.1.2 (афінне перетворення).

Афінне перетворення має вигляд

$$T(p) = Ap + t,$$

де $A \in R^{3 \times 3}$ – невідроджена матриця, що допускає масштабування і зсув.

Оптимальне перетворення знаходять шляхом мінімізації функції втрат, яка вимірює невідповідність між перетвореною вихідною і цільовою хмарами.

Визначення 2.1.3 (функція втрат L2). Стандартна квадратична функція втрат [16]

$$\mathcal{L}_{L2}(T) = \sum_{(p_i, q_i) \in C} \|T(p_i) - q_i\|^2,$$

де C – множина відповідностей між точками.

Визначення 2.1.4 (робастна функція втрат).

Щоб зменшити вплив викидів, використовують робастні функції втрат [17]:

$$\mathcal{L}_{\text{robust}}(T) = \sum_{(p_i, q_i) \in C} \rho(\|T(p_i) - q_i\|),$$

де $\rho : R_+ \rightarrow R_+$ – робастна функція, наприклад:

- функція Хубера [18]:

$$\rho_H(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}x^2, & |x| \leq \delta \\ \delta \left(|x| - \frac{1}{2}\delta \right), & |x| > \delta \end{cases};$$

- функція Тьюкі [19]:

$$\rho_T(x) = \begin{cases} \frac{c^2}{6} \left(1 - \left(1 - \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right)^3 \right), & |x| \leq c \\ \frac{c^2}{6}, & |x| > c \end{cases}.$$

Для допустимих перетворень вводяться природним чином обмеження на трансформації.

Визначення 2.1.5 (обмеження ортогональності). Для матриці обертання R :

$$R^T R = I_3, \quad \det(R) = 1.$$

Визначення 2.1.6 (обмеження на масштаб).

Для ізотропного масштабування [20]

$$T(p) = sRp + t, \quad s \in [s_{min}, s_{max}].$$

Введені вище означення дозволяють поставити задачу реєстрації хмар точок як оптимізаційну задачу.

Формулювання 2.1.1 (загальна задача реєстрації):

$$\arg \min_{T \in \mathcal{T}} (L(T) + \lambda R(T)),$$

де T – простір допустимих перетворень; $R(T)$ – регуляризаційний член; λ – параметр регуляризації [21].

Для жорсткої реєстрації

$$\arg \min_{R \in SO(3), t \in \mathbb{R}^3} \sum_{(p_i, q_i) \in C} \|Rp_i + t - q_i\|^2.$$

За такої постановки задачі ключовою проблемою є встановлення відповідностей C між точками двох хмар [22]. Ці відповідності зазвичай рахують на основі відстані до найближчої точки.

Визначення 2.1.7 (найближча точка). Для точки $p \in P$ її відповідність у Q :

$$q^* = \arg \min_{q \in Q} \|T(p) - q\|.$$

Визначення 2.1.8 (взаємні відповідності).

Пара (p, q) є взаємною відповідністю, якщо

$$q = \arg \min_{q' \in Q} \|p - q'\| \quad \text{та} \quad p = \arg \min_{p' \in P} \|p' - q\|.$$

Оскільки відповідності й перетворення взаємозалежні, то для пошуку оптимального перетворення T початкової хмари точок у цільову використовують ітеративний підхід [23].

Алгоритм 2.1.1 (загальна ітеративна схема).

1. Ініціалізація: $T^{(0)} = T_{init}$.

2. Для $k = 0, 1, 2, \dots$:

а. Знайти відповідності:

$$C^{(k)} = \text{FindCorrespondences}(P, Q, T^{(k)}).$$

б. Оновити перетворення:

$$T^{(k+1)} = \arg \min_T L(T, C^{(k)}).$$

в. Перевірити збіжність: якщо

$$\|T^{(k+1)} - T^{(k)}\| < m, \quad \text{то зупинитись.}$$

3. Повернути $T^{(k+1)}$.

Ця загальна схема лежить в основі більшості алгоритмів реєстрації, які відрізняються способами пошуку відповідностей та оптимізації перетворення.

2.2. Алгоритми розв'язання

Відомі алгоритми реєстрації хмар точок можна умовно поділити на окремі групи залежно від підходу до встановлення відповідностей між точками двох хмар. Ми розглянемо чотири найпопулярніші із цих груп.

I. Алгоритм Iterative Closest Point (ICP) та його варіанти

Алгоритм ICP є найбільш поширеним методом реєстрації хмар точок [15].

Алгоритм 2.2.1 (класичний ICP).

1. Задати початкове наближення $T^{(0)}$.

2. Повторювати до збіжності:

а. Для кожної точки $p_i \in P$ знайти найближчу точку $q_i \in Q$:

$$q_i = \arg \min_{q \in Q} \|T^{(k)}(p_i) - q\|.$$

б. Обчислити оптимальне перетворення:

$$T^{(k+1)} = \arg \min_{R, t} \sum_{i=1}^n \|Rp_i + t - q_i\|^2.$$

в. Перевірити збіжність:

$$\|T^{(k+1)} - T^{(k)}\| < \epsilon.$$

Теорема 2.2.1 (збіжність ICP). Алгоритм ICP монотонно зменшує функцію помилки і збігається до локального мінімуму [24].

Основні модифікації ICP спрямовані на покращення швидкості збіжності й робастності:

- **Point-to-plane ICP** [25] мінімізує відстань від точки до площини:

$$\mathcal{L}_{p2pl}(R, t) = \sum_{i=1}^n ((Rp_i + t - q_i) \cdot \mathbf{n}_i)^2,$$

де \mathbf{n}_i – нормаль у точці q_i .

- **Симетричний ICP** [26] враховує обидві хмари симетрично:

$$\mathcal{L}_{sym}(R, t) = \sum_{i=1}^n \|Rp_i + t - q_i\|^2 +$$

$$+ \sum_{j=1}^m \|R^{-1}(q_j - t) - p_j\|^2.$$

- **Generalized ICP** [27] об'єднує переваги підходів point-to-point та point-to-plane через імовірнісну модель:

$$\mathcal{L}_{GICP}(T) = \sum_{i=1}^n d_i^T C_i^{-1} d_i,$$

де $d_i = T(p_i) - q_i$, $C_i = C_{p_i} + T \cdot C_{q_i} \cdot T^T$ – комбінована коваріаційна матриця.

II. Методи на основі ознак

Методи на основі ознак видобувають дескриптори з локальних околів точок для встановлення відповідностей [28].

FPFH (Fast Point Feature Histogram)

Визначення 2.2.1 (FPFH дескриптор).

Для точки p_i з нормаллю \mathbf{n}_i та її околу $N(p_i)$ FPFH обчислюють так [29]:

1. Для кожної пари точок (p_i, p_j) обчислити кути Дарбу:

$$\alpha = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}_j,$$

$$\phi = \mathbf{u} \cdot \frac{p_j - p_i}{\|p_j - p_i\|},$$

$$\theta = \arctan(\mathbf{w} \cdot \mathbf{n}_j, \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}_j),$$

де $\{\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}\}$ – локальна система координат.

2. Побудувати спрощену гістограму точкових ознак (SPFH).

3. Обчислити FPFH як зважену суму SPFH:

$$FPFH(p_i) = SPFH(p_i) + \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{1}{\omega_j} \cdot SPFH(p_j).$$

SHOT (Signature of Histograms of Orientations)

Визначення 2.2.2 (SHOT дескриптор). SHOT використовує сферичну систему координат навколо кожної точки [30]:

1. Розбити сферичний окіл на сектори.

2. Для кожного сектора обчислити гістограму кутів між нормаллями.

3. Об'єднати гістограми в єдиний дескриптор.

III. Глобальна реєстрація

Методи глобальної реєстрації шукають оптимальне перетворення без початкового наближення.

RANSAC для реєстрації

Алгоритм 2.2.2 (RANSAC для 3-точкових відповідностей) [31]:

1. Випадково вибрати три пари відповідних точок.

2. Обчислити перетворення T за методом Кабша–Умеями [32].

3. Оцінити кількість точок даних, які відповідають загальній моделі або закономірності:

$$N_{inliers} = \left| \left\{ (p_i, q_j) : \|T(p_i) - q_j\| < \tau \right\} \right|.$$

4. Повторити k разів і вибрати T з максимальним $N_{inliers}$.

Кількість ітерацій

$$k = \frac{\log(1-p)}{\log(1-w^3)},$$

де p – бажана ймовірність успіху; w – частка відповідних точок даних.

4PCS (4-Points Congruent Sets)

Алгоритм 4PCS [33] використовує геометричні інваріанти для ефективного пошуку відповідностей.

Визначення 2.2.3 (конгруентна четвірка). Дві четвірки точок (p_1, p_2, p_3, p_4) та (q_1, q_2, q_3, q_4) є конгруентними, якщо

$$\|p_i - p_j\| = \|q_i - q_j\|, \quad \forall i, j \in \{1, 2, 3, 4\}.$$

Алгоритм 2.2.3 (Super 4PCS) [34]:

1. Вибрати базову четвірку в P .

2. Використати геометричні обмеження для швидкого пошуку конгруентних четвірок у Q .

3. Верифікувати кандидатів через підрахунок відповідних точок даних.

4. Вибрати перетворення з максимальною підтримкою.

IV. Методи на основі глибинного навчання

Використовують нейронні мережі для отримання ознак, робастних до шуму і часткових перекриттів [35].

Порівняння методів реєстрації

Таблиця 1. Порівняння методів реєстрації

Метод	Складність	Точність	Вимоги до ініціалізації	Робастність
Методи ICP	Середня-Висока	Висока	Потребує	Низька
FPFH + RANSAC	Висока	Середня	Не потребує	Висока
4PCS	Дуже висока	Висока	Не потребує	Висока
Глибинне навчання	Середня	Висока	Не потребує	Дуже висока

3. Методи виявлення змін

Після успішної реєстрації хмар точок різних епох постає завдання безпосереднього виявлення і класифікації змін. Методи виявлення змін можна поділити на три основні категорії: прямі методи, що ґрунтуються на геометричному порівнянні, методи на основі сегментації, які працюють з об'єктами, та ймовірнісні підходи, що враховують невизначеність вимірювань. Розглянемо кожен метод детально.

3.1. Прямі методи

Прямі методи виявлення змін ґрунтуються на безпосередньому порівнянні геометричних характеристик зареєстрованих хмар точок. Ці методи є найпростішими в реалізації та інтерпретації результатів, але часто чутливі до шуму й неповноти даних.

Порогова обробка відстаней

Найпростіший підхід полягає в обчисленні відстаней між відповідними точками або від точок до найближчих поверхонь і застосуванні порогу для класифікації змін [36].

Визначення 3.1.1 (проста порогова класифікація). Для кожної точки $p_i \in P^{(t_1)}$ визначаємо статус зміни:

$$\text{change}(p_i) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } d(p_i, Q^{(t_2)}) > \tau \\ 0, & \text{інакше} \end{cases},$$

де $d(p_i, Q^{(t_2)}) = \min_{q \in Q^{(t_2)}} \|p_i - q\|$ – відстань до найближчої точки.

Утім, простий поріг не враховує напрямку зміни. Щоб розрізнити появу і зникнення об'єктів, використовують двонаправлений аналіз.

Алгоритм 3.1.1 (двонаправлене виявлення змін).

1. Для кожної точки $p \in P^{(t_1)}$:
 - якщо $\min_{q \in Q^{(t_2)}} \|p - q\| > \tau$, позначити як «зникнення».
2. Для кожної точки $q \in Q^{(t_2)}$:
 - якщо $\min_{p \in P^{(t_1)}} \|q - p\| > \tau$, позначити як «поява».

Адаптивні пороги

Фіксований поріг не враховує локальних характеристик поверхні та точності вимірювань. Адаптивні методи обчислюють поріг на основі локальних властивостей [37].

Визначення 3.1.2 (адаптивний поріг). Адаптивний поріг визначають як

$$\tau_{\text{adaptive}}(p_i) = k \cdot \sigma_{\text{local}}(p_i) + \tau_{\text{base}},$$

де $\sigma_{\text{local}}(p_i)$ – локальне стандартне відхилення в околі точки; k – коефіцієнт (типово 2-3);

τ_{base} – базовий поріг.

Статистичний аналіз відхилень

Для стійкого виявлення змін за наявності шуму використовують статистичні тести [1]. Метод МЗС2, описаний у підрозд. 1.2, є прикладом такого підходу.

Визначення 3.1.3 (статистичний тест на зміну). Для локального околу точки p_i перевіряють таку гіпотезу:

- H_0 : відстань між поверхнями дорівнює нулю;
- H_1 : відстань між поверхнями значуще різниться від нуля.

Тест-статистика:

$$t = \frac{|d_{M3C2}(p_i)|}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2} + \sigma_{reg}^2}}$$

Зміну вважають статистично значущою, якщо $t > t_{\alpha/2}$, де $t_{\alpha/2}$ – критичне значення t -розподілу.

Кластеризація змін

Окремі точки, класифіковані як зміни, часто є шумом або викидами. Для виділення значущих областей змін застосовують методи кластеризації.

DBSCAN для виявлення змін

Алгоритм DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) ефективно виділяє щільні кластери змін і фільтрує шум [38].

Алгоритм 3.1.2 (DBSCAN для змін).

Вхід: точки змін $C = \{p : \text{change}(p) = 1\}$,

параметри m (радіус) та $minPts$ (мінімальна кількість точок).

1. Для кожної точки $p \in C$:
 - знайти m -оکیل:

$$N_m(p) = \{q \in C : \|p - q\| < m\};$$

- якщо $|N_m(p)| \geq minPts$, позначити p як core point.

2. Об'єднати core points, що містяться в m -околах одне одного.

3. Приєднати border points до найближчих кластерів.

4. Точки, що не належать жодному кластеру, вважати шумом.

Mean Shift для виявлення змін

Mean Shift не вимагає попереднього задання кількості кластерів та автоматично визначає їх форму [39].

Визначення 3.1.4 (Mean Shift вектор).

Для точки x з ядром K і шириною вікна h :

$$m(x) = \frac{\sum_{x_i \in C} K\left(\frac{\|x - x_i\|^2}{h^2}\right) x_i}{\sum_{x_i \in C} K\left(\frac{\|x - x_i\|^2}{h^2}\right)} - x.$$

Алгоритм ітеративно зміщує кожну точку у напрямку збільшення щільності до збіжності.

3.2. Методи на основі сегментації

Методи на основі сегментації працюють не з окремими точками, а з об'єктами чи сегментами, що дозволяє більш надійно виявляти структурні зміни [40].

Математична модель сегментації

Визначення 3.2.1 (сегментація хмари точок).

Сегментація – це розбиття хмари точок P на непересічні підмножини: $P = \bigcup_{i=1}^k S_i$, $S_i \cap S_j = \emptyset$ для $i \neq j$, де кожний сегмент S_i відповідає окремому об'єкту або частині поверхні.

Критерії сегментації включають такі вимоги:

- **геометрична однорідність** – точки належать одній площині або примітиву;
- **просторова зв'язність** – точки утворюють зв'язну область;
- **семантична спільність** – точки мають схожі атрибути (колір, інтенсивність).

Порівняння сегментів

Після сегментації обох хмар точок порівнюють відповідні сегменти [41].

Визначення 3.2.2 (відповідність сегментів).

Сегменти $S_i^{(t_1)} \subset P^{(t_1)}$ та $S_j^{(t_2)} \subset Q^{(t_2)}$ вважають відповідними, якщо

$$IoU(S_i^{(t_1)}, S_j^{(t_2)}) = \frac{|S_i^{(t_1)} \cap S_j^{(t_2)}|}{|S_i^{(t_1)} \cup S_j^{(t_2)}|} > \theta,$$

де IoU – Intersection over Union; θ – поріг (типово 0,5).

Алгоритм 3.2.1 (виявлення змін на основі сегментів).

1. Сегментувати $P^{(t_1)} \rightarrow \{S_1^{(t_1)}, \dots, S_m^{(t_1)}\}$.
2. Сегментувати $Q^{(t_2)} \rightarrow \{S_1^{(t_2)}, \dots, S_n^{(t_2)}\}$.
3. Для кожного сегмента $S_i^{(t_1)}$:
 - знайти найкращу відповідність:

$$j^* = \operatorname{argmax}_j IoU(S_i^{(t_1)}, S_j^{(t_2)});$$

– якщо $\text{IoU}(S_i^{(t_1)}, S_j^{(t_2)}) < \theta$, позначити як «зниклий»;

– інакше порівняти геометричні властивості для виявлення деформацій.

4. Для кожного незіставленого $S_j^{(t_2)}$ позначити як «новий».

Графові подання і порівняння

Для аналізу топологічних змін використовують графові моделі.

Визначення 3.2.3 (граф сусідства сегментів).

Граф

$$G = (V, E),$$

де $V = \{S_1, \dots, S_k\}$ – вершини відповідають сегментам; $E = \{(S_i, S_j) : \text{adjacent}(S_i, S_j)\}$ – ребра з'єднують сусідні сегменти.

Функція сусідства може ґрунтуватися на відстані між центроїдами, спільній межі або семантичних зв'язках.

Алгоритм 3.2.2 (порівняння графів для виявлення змін).

1. Побудувати графи $G^{(t_1)}$ та $G^{(t_2)}$.
2. Знайти ізоморфні підграфи (незмінні структури).
3. Виявити:
 - додані/видалені вершини (об'єкти);
 - змінені ребра (топологічні зміни);
 - модифіковані атрибути вершин (геометричні зміни).

3.3. Імовірнісні підходи

Імовірнісні методи явно моделюють невизначеність вимірювань і надають не лише бінарну класифікацію змін, але й оцінку впевненості.

Байєсівська модель змін

Визначення 3.3.1 (байєсівська модель). Нехай $\mathbf{z}_i^{(t)}$ – спостереження у точці i в момент t , c_i – індикатор зміни.

- Апостеріорна ймовірність зміни:

$$P(c_i = 1 | \mathbf{z}_i^{(t_1)}, \mathbf{z}_i^{(t_2)}) = \frac{P(\mathbf{z}_i^{(t_1)}, \mathbf{z}_i^{(t_2)} | c_i = 1)P(c_i = 1)}{P(\mathbf{z}_i^{(t_1)}, \mathbf{z}_i^{(t_2)})}.$$

- Правдоподібність за умови відсутності змін:

$$P(\mathbf{z}_i^{(t_1)}, \mathbf{z}_i^{(t_2)} | c_i = 0) = N(\mathbf{z}_i^{(t_1)} - \mathbf{z}_i^{(t_2)}; 0, \Sigma_{noise}).$$

- Правдоподібність за умови зміни:

$$P(\mathbf{z}_i^{(t_1)}, \mathbf{z}_i^{(t_2)} | c_i = 1) = U(\mathbf{z}_i^{(t_1)}) \cdot U(\mathbf{z}_i^{(t_2)}),$$

де U – рівномірний розподіл у просторі спостережень.

Теорія Демпстера–Шефера

Теорія Демпстера–Шефера дозволяє явно моделювати невизначеність і комбінувати свідчення з різних джерел.

Визначення 3.3.2 (функція маси імовірності).

Для гіпотез $\Theta = \{\text{зміна, без змін}\}$ визначають

$$m : 2^\Theta \rightarrow [0, 1], \quad \sum_{A \in \Theta} m(A) = 1,$$

де $m(A)$ – маса імовірності, приписана підмножині A .

Правило комбінування Демпстера:

$$(m_1 \oplus m_2)(A) = \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C)}{1 - K},$$

де $K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) \cdot m_2(C)$ – міра конфлікту.

Оцінка невизначеності

Для кожного рішення про зміну важливо оцінити рівень впевненості.

Визначення 3.3.3 (ентропія рішення). Невизначеність класифікації у точці

$$H(p_i) = - \sum_{c \in \{0,1\}} P(c_i = c | \mathbf{z}_i) \log P(c_i = c | \mathbf{z}_i).$$

Високі значення ентропії вказують на невпевненість у класифікації.

Методи Монте-Карло для оцінювання невизначеності змін

Щоб врахувати похибки реєстрації та вимірювань, використовують методи Монте-Карло.

Алгоритм 3.3.1 (метод Монте-Карло для оцінювання невизначеності змін).

1. Для $k = 1, \dots, N$:
 - згенерувати збурені версії змар:

$$\tilde{P}^{(k)} = P + \varepsilon_p^{(k)}, \quad \tilde{Q}^{(k)} = Q + \varepsilon_Q^{(k)};$$

- згенерувати збурення реєстрації:

$$\tilde{T}^{(k)} = T + \delta T^{(k)};$$

- обчислити зміни:

$$P(\text{change}_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbb{I}[i \in C^{(k)}].$$

2. Оцінити ймовірність зміни:

$$P(\text{change}_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbb{I}[i \in C^{(k)}].$$

3. Обчислити довірчі інтервали для параметрів змін.

Порівняння методів

Порівняльний аналіз різних категорій методів виявлення змін (табл. 2) ґрунтується на експериментальних результатах і теоретичних характеристиках, описаних у літературі [5, 6, 8].

Переваги й недоліки за такими категоріями:

Прямі методи:

- *Переваги:* простота реалізації, швидкість обчислень, прямий зв'язок з фізичними змінами.

- *Недоліки:* висока чутливість до шуму і похибок реєстрації, складність вибору порогів.
- *Застосування:* попередній аналіз, моніторинг у реальному часі, великі території.

Методи на основі сегментації:

- *Переваги:* робастність до локального шуму, збереження об'єктної структури, можливість семантичного аналізу.
- *Недоліки:* залежність від якості сегментації, втрата дрібних деталей, обчислювальна складність.
- *Застосування:* міські сцени, моніторинг будівель, аналіз інфраструктури.

Імовірнісні підходи:

- *Переваги:* оцінка невизначеності, інтеграція різних джерел даних, статистична обґрунтованість.
- *Недоліки:* висока обчислювальна складність, потреба в калібруванні моделей, складність інтерпретації.
- *Застосування:* критичні об'єкти, наукові дослідження, прийняття рішень з оцінкою ризиків.

Таблиця 2. Порівняння методів виявлення змін

Характеристика	Прямі методи	Методи на основі сегментації	Імовірнісні підходи
Обчислювальна складність	Середня	Висока	Дуже висока
Точність виявлення	Середня	Висока	Висока
Стійкість до шуму	Низька	Середня-висока	Висока
Вимоги до даних	Мінімальні	Потребують якісної сегментації	Потребують статистичних моделей
Інтерпретовність	Висока	Середня	Низька-середня
Час обробки	Швидко (секунди)	Середньо (хвилини)	Повільно (години)

4. Сучасні підходи машинного навчання

Останнє десятиліття ознаменувалося революційними змінами у сфері обробки тривимірних даних завдяки розвитку спеціалізованих архітектур глибокого навчання. На відміну від зображень, хмари точок не мають регулярної структури, що створювало фундаментальні виклики для застосування традиційних згорткових мереж. Розроблення нових архітектур, адаптованих до неструктурованої природи 3D-даних, відкрило нові можливості для автоматизованого виявлення змін із безпрецедентною точністю.

Піонерська робота PointNet [2] вирішила проблему неупорядкованості хмар точок через застосування симетричної функції агрегації.

Архітектура PointNet:

$$f(\{x_1, \dots, x_n\}) = \gamma \circ g(h(x_1), \dots, h(x_n)),$$

де $h: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^k$ – поточкова функція (MLP) для видобування локальних ознак; g – симетрична функція (max pooling); γ – фінальна обробка.

Архітектура PointNet++ [42] розширює базову архітектуру ієрархічним підходом за допомогою модуля Set Abstraction, що складається із:

1. Семплювання – вибір N' центроїдів з N точок (Farthest Point Sampling).
2. Групування – формування локальних околів радіуса r .
3. PointNet – обробка кожного локального околу:

$$f_{l+1} = \text{SetAbstraction}(N_l, C_l, f_l) \rightarrow (N_{l+1}, C_{l+1}, f_{l+1}),$$

де N_l – кількість точок; C_l – розмірність ознак; f_l – ознаки на рівні l .

Графові нейронні мережі є альтернативним підходом, вони природним чином моделюють локальну структуру хмар точок [3].

Для хмари P будемо граф $G = (V, E)$:

- $V = P$ – вершини відповідають точкам;
- $E = \{(p_i, p_j) : p_j \in \text{kNN}(p_i)\}$ – ребра

з'єднують k найближчих сусідів.

Тоді операція згортки на графі (GCN) може бути визначена як

$$h_i^{(l+1)} = \sigma \left(\sum_{j \in N(i)} W^{(l)} h_j^{(l)} + b^{(l)} \right),$$

де $h_i^{(l)}$ – ознаки вершини i на шарі l ; $N(i)$ – множина сусідів; $W^{(l)}$, $b^{(l)}$ – параметри, що навчаються.

Dynamic Graph CNN (DGCNN) [3] оновлює граф після кожного шару:

$$h_i^{(l+1)} = \max_{j \in N^{(l)}(i)} \text{MLP}^{(l)}(h_i^{(l)}, h_j^{(l)} - h_i^{(l)}),$$

де $N^{(l)}(i)$ – динамічні сусіди у просторі ознак шару l . Архітектура трансформерів [43] може

бути адаптована для обробки хмар точок, дозволяючи моделювати глобальні залежності.

Point Transformer [44] використовує векторну увагу:

$$y_i = \sum_{j \in N(i)} \rho(\gamma(f_i - f_j + \delta)) \odot (\alpha(f_j) + \delta),$$

де f_i – ознаки точки i ; γ , α – лінійні проєкції; ρ – softmax нормалізація; δ – позиційне кодування.

Трансформери дозволяють моделювати «далекі» залежності, забезпечують паралельну обробку й адаптивну рецептивну область.

Ще одна архітектура – сіамські мережі (Siamese Networks) [4] – ефективна для безпосереднього порівняння двох хмар точок без явної реєстрації. Сіамська мережа складається із:

- двох ідентичних енкoderів зі спільними вагами: $f_\theta : P \rightarrow \mathbb{R}^d$;

– модуля порівняння: $g_\phi : \mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^d \rightarrow \{0, 1\}$.

Така архітектура забезпечує експериментальні результати, кращі за інші відомі методи:

- на наборі даних URB3DCD – покращення метрики IoU (Intersection over Union) на 27 пунктів порівняно з іншими методами машинного навчання [4];

- SiamPointNet++ на даних Rotterdam – перевага над об'єктними методами, менше гіперпараметрів.

Особливості розглянутих архітектур нейронних мереж для хмар точок зведено у табл. 3.

Іншим аспектом, критичним для ефективного навчання моделей виявлення змін, є правильний вибір функції втрат.

Для задач реконструкції та порівняння хмар точок як функцію втрат зазвичай використовують Chamfer Distance [51]:

Таблиця 3. Порівняння методів виявлення змін

Архітектура	Інваріантність до порядку	Локальний контекст	Глобальний контекст	Складність	Точність
PointNet	✓	✗	✓	Середня	Середня
PointNet++	✓	✓	✓	Висока	Висока
DGCNN	✓	✓	✓	Дуже висока	Висока
Point Transformer	✓	✓	✓	Дуже висока	Дуже висока
Siamese KPConv	✓	✓	✓	Висока	Найвища для змін

$$L_{CD}(P, Q) = \frac{1}{|P|} \sum_{p \in P} \min_{q \in Q} \|p - q\|^2 + \frac{1}{|Q|} \sum_{q \in Q} \min_{p \in P} \|q - p\|^2,$$

або її модифікації – Weighted Chamfer для врахування важливості точок чи Robust Chamfer, де замість L2 використано норму Huber.

5. Практичні аспекти та експерименти

Перехід від теоретичних моделей до практичного застосування методів виявлення змін у 3D-середовищі вимагає враховувати численні фактори, що впливають на ефективність алгоритмів. У цьому розділі опишемо порівняльне дослідження різних методів на реальних наборах даних і метрики оцінювання якості, що дозволяють об'єктивно оцінити продуктивність алгоритмів.

Таблиця 4. Набори даних, використані для тестування методів виявлення змін

Назва	Опис
URB3DCD [45]	П'ять наборів пар анотованих хмар точок міської забудови; дані отримано за допомогою симуляції, завдяки чому відомий також і рівень шуму серед цих даних
AHN-CD [46]	Цифрова карта висот території Нідерландів за чотири часові періоди

Щоб оцінити методи бінарної класифікації змін, використовують метрики на основі матриці помилок (табл. 5) [6].

Таблиця 5. Матриця помилок для виявлення змін

Факт	Передбачення: є зміни	Передбачення: без змін
Є зміни	True Positive (TP)	False Negative (FN)
Без змін	False Positive (FP)	True Negative (TN)

Такими метриками є:

- точність (Precision) – вимірює кількість правильно знайдених результатів:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP};$$

- повнота (Recall) – вимірює кількість знайдених правильних результатів:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN};$$

- F1-score – збалансовано комбінує точність і повноту в одне значення:

$$\text{F1-score} = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}};$$

- IoU (Intersection-over-Union) – вимірює перетин між передбаченою областю змін і реальною областю змін, поділений на їх об'єднання:

$$\text{IoU} = \frac{TP}{TP + FP + FN}.$$

У загальному випадку, коли є декілька класів прогнозованих змін, використовують усереднений IoU (mean IoU):

$$\text{mean IoU} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{IoU}_i,$$

де n – кількість класів змін.

Щоб оцінити просторову точність і стабільність реєстрації, у тривимірних даних застосовують спеціалізовану метрику – рівень виявлення (Level of Detection, LoD). Вона дозволяє визначити найменше значущє зміщення, яке може бути достовірно виявлене між двома епохами вимірювань з урахуванням внутрішньої варіації та похибки реєстрації. Згідно з [1] рівень виявлення з 95 % довірчим інтервалом розраховують так:

$$\text{LoD}_{95\%} = \pm 1.96 \sqrt{\frac{\sigma_A^2}{n_A} + \frac{\sigma_B^2}{n_B} + \sigma_{reg}^2},$$

де σ_A^2 , σ_B^2 – дисперсії вимірювань позицій точок в епохах А та В; n_A , n_B – кількість точок; σ_{reg} – похибка реєстрації хмар точок у спільній системі координат.

Порівняння методів

У розглянутій літературі згадується небагато методів виявлення змін, які аналізують без-

посередньо хмари тривимірних точок. З-поміж знайдених звітів фігурують такі методи, як C2C [36], M3C2 [1], Random Forest [47], Unsupervised Siamese KPConv [48], Supervised Siamese KPConv [4]. Числові характеристики їх роботи наведено у табл. 6.

Рекомендації з вибору методу виявлення змін

Експериментальне порівняння методів виявлення змін у 3D-даних демонструє, що немає універсального рішення для всіх застосувань. Вибір оптимального методу залежить від специфіки задачі, характеристик даних та обчислювальних ресурсів. Сучасні методи глибокого навчання показують найкращі результати за точністю, але вимагають значних обчислювальних ресурсів, а у випадку керованого навчання – анованих даних. Геометричні методи залишаються актуальними для задач, де важливі інтерпретовність і швидкість обробки. Отже, перспективним напрямом можна вважати розробку гібридних підходів, які поєднують переваги різних типів методів.

Висновки

Проведений аналіз методів виявлення змін у 3D-середовищі показує поступовий розвиток математичних моделей та алгоритмів. З-поміж помітних результатів можна виділити метрику M3C2 для статистичного порівняння поверхонь, удосконалення методів реєстрації від ICP до алгоритмів глобальної реєстрації та адаптацію архітектури глибокого навчання для обробки хмар точок. Сіамські мережі продемонстрували покращення метрики IoU порівняно із традиційними методами. Розроблені підходи застосовують у моніторингу міської інфраструктури, контролі промислових об'єктів та екологічних дослідженнях.

Водночас є низка нерозв'язаних проблем. Обчислювальна складність більшості методів обмежує їх використання для великих наборів даних. Підтримка моделі цифрового двійника середовища в актуальному стані потребує розробки нових алгоритмів. Неповнота даних через оклюзії та варіативність щільності точок при використанні різних сенсорів та за різно-

Таблиця 6. Порівняння методів виявлення змін

Клас методу →			Distance-based	Distance-based	Distance-based	Machine Learning	Deep Learning	Deep Learning
Метод →			C2C	M3C2 + 2 класи змін	M3C2 + 3 класи змін	Random Forest	Unsupervised	Supervised
Рік і джерело ↓	Набір даних ↓	Метрика ↓					Siamese KPConv transfer	Siamese KPConv
(2021) [45]	URB3DCD	mean IoU	0,5	0,34	0,3	0,64	-	-
(2023) [48]	AHN-CD	mean IoU	0,65	0,43	-	0,67	0,7	0,9
		time	5s	5s	-	3min	25s	25s

го рівня освітлення ускладнюють порівняння. Більшість методів фокусується на геометричних змінах без урахування семантичного контексту.

Можливими напрямками розвитку є комбінування геометричних методів з підходами машинного навчання, використання методів самонавчання для зменшення потреби в анованих даних, інтеграція систем виявлення змін з цифровими моделями середовища і до-

слідження можливостей трансформерів і графових мереж для обробки 3D-даних. Ці підходи можуть частково вирішити наявні обмеження.

Подальший розвиток галузі потребує створення стандартизованих тестових наборів даних для об'єктивного порівняння методів, співпраці між дослідниками з різних груп і доступності програмних реалізацій. Такий підхід сприятиме поступовому вдосконаленню методів виявлення змін у 3D-середовищі.

References

- [1] D. Lague *et al.*, “Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N–Z)”, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 82, pp. 10–26, Aug. 2013. doi: 10.1016/j.isprs.2013.04.009.
- [2] R.Q. Charles *et al.*, “PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation”, in *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, HI: IEEE, pp. 77–85, July 2017. doi: 10.1109/CVPR.2017.16.
- [3] Y. Wang *et al.*, “Dynamic Graph CNN for Learning on Point Clouds,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 38, no. 5, pp. 1–12, Oct. 2019, doi: 10.1145/3326362.
- [4] I. De Gélis *et al.*, “Siamese KPConv: 3D multiple change detection from raw point clouds using deep learning”, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 197, pp. 274–291, Mar. 2023. doi: 10.1016/j.isprs.2023.02.001.
- [5] U. Stilla and Y. Xu, “Change detection of urban objects using 3D point clouds: A review”, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 197, pp. 228–255, Mar. 2023. doi: 10.1016/j.isprs.2023.01.010.
- [6] A. Shafique *et al.*, “Deep Learning-Based Change Detection in Remote Sensing Images: A Review,” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 4, p. 871, Feb. 2022. doi: 10.3390/rs14040871.
- [7] R. Qin *et al.*, “3D change detection – Approaches and applications” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 122, pp. 41–56, Dec. 2016. doi: 10.1016/j.isprs.2016.09.013.
- [8] A. Kharroubi *et al.*, “Three Dimensional Change Detection Using Point Clouds: A Review,” *Geomatics*, vol. 2, no. 4, pp. 457–485, Oct. 2022. doi: 10.3390/geomatics2040025.
- [9] C. Andresen and E. Schultz-Fellenz, “Change Detection Applications in the Earth Sciences Using UAS-Based Sensing: A Review and Future Opportunities”, *Drones*, Apr. 2023. doi: 10.3390/DRONES7040258.
- [10] E.P. Herrera-Granda *et al.*, “Monocular visual SLAM, visual odometry, and structure from motion methods applied to 3D reconstruction: A comprehensive survey”, *Heliyon*, vol. 10, no. 18, p. e37356, Sept. 2024. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e37356.
- [11] H. Fan *et al.*, “A Point Set Generation Network for 3D Object Reconstruction from a Single Image”, in *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, HI: IEEE, pp. 2463–2471, July 2017. doi: 10.1109/CVPR.2017.264.
- [12] J. Gehring *et al.*, “A VOXEL-BASED METADATA STRUCTURE FOR CHANGE DETECTION IN POINT CLOUDS OF LARGE-SCALE URBAN AREAS”, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. IV-2, pp. 97–104, May 2018. doi: 10.5194/isprs-annals-IV-2-97-2018.
- [13] M.M. Bronstein and I. Kokkinos, “Scale-invariant heat kernel signatures for non-rigid shape recognition”, in *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Francisco, CA, USA: IEEE, pp. 1704–1711, June 2010. doi: 10.1109/CVPR.2010.5539838.
- [14] F. Pomerleau *et al.*, “A Review of Point Cloud Registration Algorithms for Mobile Robotics”, *Found. Trends® Robot.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–104, 2015. doi: 10.1561/23000000035.
- [15] P.J. Besl and N.D. McKay, “A method for registration of 3-D shapes”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 14, no. 2, pp. 239–256, Feb. 1992. doi: 10.1109/34.121791.
- [16] Y. Chen and G. Medioni, “Object modelling by registration of multiple range images”, *Image Vis. Comput.*, vol. 10, no. 3, pp. 145–155, Apr. 1992. doi: 10.1016/0262-8856(92)90066-C.
- [17] Q.-Y. Zhou *et al.*, “Fast Global Registration”, in *Computer Vision – ECCV 2016*, vol. 9906, B. Leibe, J. Matas, N. Sebe, and M. Welling, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 766–782. Accessed: July 30, 2025. [Online]. Retrieved from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-46475-6_47
- [18] P.J. Huber, “Robust Estimation of a Location Parameter”, *Ann. Math. Stat.*, vol. 35, no. 1, pp. 73–101, Mar. 1964, doi: 10.1214/aoms/1177703732.
- [19] A.E. Beaton and J.W. Tukey, “The Fitting of Power Series, Meaning Polynomials, Illustrated on Band-Spectroscopic Data”, *Technometrics*, vol. 16, no. 2, pp. 147–185, May 1974. doi: 10.1080/00401706.1974.10489171.
- [20] B.K.P. Horn *et al.*, “Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices”, *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 5, no. 7, p. 1127, July 1988. doi: 10.1364/JOSAA.5.001127.
- [21] A. Myronenko and Xubo Song, “Point Set Registration: Coherent Point Drift”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 32, no. 12, pp. 2262–2275, Dec. 2010. doi: 10.1109/TPAMI.2010.46.
- [22] S. Rusinkiewicz and M. Levoy, “Efficient variants of the ICP algorithm”, in *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, Quebec City, Que., Canada: IEEE Comput. Soc, 2001, pp. 145–152. doi: 10.1109/IM.2001.924423.
- [23] G.K.L. Tam *et al.*, “Registration of 3D Point Clouds and Meshes: A Survey from Rigid to Nonrigid”, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 19, no. 7, pp. 1199–1217, July 2013. doi: 10.1109/TVCG.2012.310.
- [24] Z. Zhang, “Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces”, *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 13, no. 2, pp. 119–152, Oct. 1994. doi: 10.1007/BF01427149.
- [25] K.-L. Low, “Linear Least-Squares Optimization for Point-to-Plane ICP Surface Registration”.

- [26] S. Rusinkiewicz, “A symmetric objective function for ICP”, *ACM Trans. Graph.*, vol. 38, no. 4, pp. 1–7, Aug. 2019, doi: 10.1145/3306346.3323037.
- [27] A. Segal *et al.*, “Generalized-ICP”, in *Robotics: Science and Systems V, Robotics: Science and Systems Foundation*, June 2009. doi: 10.15607/RSS.2009.V.021.
- [28] Y. Guo *et al.*, “3D Object Recognition in Cluttered Scenes with Local Surface Features: A Survey”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 36, no. 11, pp. 2270–2287, Nov. 2014. doi: 10.1109/TPAMI.2014.2316828.
- [29] R.B. Rusu *et al.*, “Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D registration”, in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe: IEEE, pp. 3212–3217, May 2009. doi: 10.1109/ROBOT.2009.5152473.
- [30] D. Hutchison *et al.*, “Unique Signatures of Histograms for Local Surface Description”, in *Computer Vision – ECCV 2010*, vol. 6313, K. Daniilidis, P. Maragos, and N. Paragios, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 356–369. Accessed: July 30, 2025. [Online]. Retrieved from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-15558-1_26
- [31] M.A. Fischler and R.C. Bolles, “Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography”, *Commun. ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381–395, June 1981. doi: 10.1145/358669.358692.
- [32] J. Lawrence *et al.*, “A Purely Algebraic Justification of the Kabsch-Umeyama Algorithm”, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 124, p. 124028, Oct. 2019. doi: 10.6028/jres.124.028.
- [33] D. Aiger *et al.*, “4-points congruent sets for robust pairwise surface registration”, in *ACM SIGGRAPH 2008 papers*, Los Angeles California: ACM, pp. 1–10, Aug. 2008. doi: 10.1145/1399504.1360684.
- [34] N. Mellado *et al.*, “Super 4PCS Fast Global Pointcloud Registration via Smart Indexing”, *Comput. Graph. Forum*, vol. 33, no. 5, pp. 205–215, Aug. 2014. doi: 10.1111/cgf.12446.
- [35] S. Huang *et al.*, “PREDATOR: Registration of 3D Point Clouds with Low Overlap”, in *2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Nashville, TN, USA: IEEE, pp. 4265–4274, June 2021. doi: 10.1109/CVPR46437.2021.00425.
- [36] D. Girardeau-Montaut *et al.*, “CHANGE DETECTION ON POINTS CLOUD DATA ACQUIRED WITH A GROUND LASER SCANNER”, 2005.
- [37] R. Lindenbergh and P. Pietrzyk, “Change detection and deformation analysis using static and mobile laser scanning”, *Appl. Geomat.*, vol. 7, no. 2, pp. 65–74, June 2015. doi: 10.1007/s12518-014-0151-y.
- [38] M. Ester *et al.*, “A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise”.
- [39] D. Comaniciu and P. Meer, “Mean shift: a robust approach toward feature space analysis”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no. 5, pp. 603–619, May 2002. doi: 10.1109/34.1000236.
- [40] G. Vosselman *et al.*, “Contextual segment-based classification of airborne laser scanner data”, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 128, pp. 354–371, June 2017. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2017.03.010.
- [41] Y. Xu *et al.*, “Pairwise coarse registration of point clouds in urban scenes using voxel-based 4-planes congruent sets”, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 151, pp. 106–123, May 2019. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2019.02.015.
- [42] C.R. Qi *et al.*, “PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space”, June 07, 2017, arXiv: arXiv:1706.02413. doi: 10.48550/arXiv.1706.02413.
- [43] A. Vaswani *et al.*, “Attention Is All You Need”, 2017, arXiv. doi: 10.48550/ARXIV.1706.03762.
- [44] H. Zhao *et al.*, “Point Transformer”, in *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Montreal, QC, Canada: IEEE, pp. 16239–16248, Oct. 2021. doi: 10.1109/ICCV48922.2021.01595.
- [45] I. De Gélis *et al.*, “Change Detection in Urban Point Clouds: An Experimental Comparison with Simulated 3D Datasets”, *Remote Sens.*, vol. 13, no. 13, p. 2629, July 2021. doi: 10.3390/rs13132629.
- [46] C.V.D. Sande *et al.*, “Assessment of Relative Accuracy of AHN-2 Laser Scanning Data Using Planar Features”, *Sensors*, vol. 10, no. 9, pp. 8198–8214, Sept. 2010. doi: 10.3390/s100908198.
- [47] T. Tran *et al.*, “Integrated Change Detection and Classification in Urban Areas Based on Airborne Laser Scanning Point Clouds”, *Sensors*, vol. 18, no. 2, p. 448, Feb. 2018. doi: 10.3390/s18020448.
- [48] I. De Gélis *et al.*, “Deep unsupervised learning for 3D ALS point clouds change detection”, *ISPRS Open J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 9, p. 100044, Aug. 2023. doi: 10.1016/j.ophoto.2023.100044.

O.R. Chertov, S.Yu. Sakharov

ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS AND METHODS FOR 3D ENVIRONMENT CHANGE DETECTION FROM IMAGERY

Background. Automated detection of changes in threedimensional (3D) environments constitutes a fundamental challenge in the development and maintenance of urban infrastructure digital twins, environmental monitoring systems, and facility security applications. Current methodologies exhibit limitations in uncertainty quantification, computational scalability for extensive datasets, and semantic information integration. Existing reviews predominantly emphasise technical implementations or domain-specific applications, with insufficient

attention to the particularities of the mathematical methods used. This gap impedes the principled selection of algorithms for digital twin actualisation.

Objective. To provide a comprehensive systematisation and comparative analysis of mathematical models and computational methods for three-dimensional environmental change detection. To establish a taxonomic framework that delineates methodological advantages, constraints, and applicability domains. To formulate evidence-based recommendations for method selection across diverse monitoring scenarios of 3D environment.

Methods. We conducted a systematic analysis encompassing classical geometric approaches for point cloud registration and comparison, statistical frameworks for uncertainty quantification, and contemporary machine learning paradigms for automated change classification. Formal mathematical representations were developed for three-dimensional data structures, change typologies, and corresponding evaluation metrics.

Results. The unified mathematical framework for characterising diverse change phenomena in three-dimensional environments was established, providing a theoretical foundation for automated digital twin synchronisation. Method selection criteria were derived based on data properties and application-specific requirements. Empirical evidence demonstrates that hybrid architectures integrating geometric primitives with machine learning techniques achieve superior accuracy while preserving interpretability in digital environment model updates.

Conclusions. The proposed systematic framework facilitates principled method selection for specific change detection applications. Future research directions include the development of self-adaptive algorithms with autonomous parameter optimisation and the incorporation of semantic reasoning through advanced deep learning architectures.

Keywords: 3D environment changes; point clouds; digital twin; computer vision; machine learning.

Рекомендована Радою
факультету прикладної математики
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
22 червня 2025 року

Прийнята до публікації
08 вересня 2025 року

DOI: 10.20535/kpissn.2025.3.339188

УДК 519.8, 004.9

М.О. Щьоголев^{1*}, В.В. Циганок^{1, 2}¹КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна²Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: shchoholiev.maksym@gmail.com

МЕТОД КОРИГУВАННЯ ІНДЕКСУ СОЦІАЛЬНОЇ НАПРУЖЕНОСТІ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ УЗГОДЖЕНОСТІ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК

Проблематика. Соціальна напруженість є предметом багатьох сучасних соціологічних досліджень, оскільки вона має значний вплив на успішність реалізації прийнятих рішень як на державному рівні, так і в бізнесі. Соціальну напруженість можна визначати на основі аналізу реакцій людей на новинні події у соціальних мережах. Отримання узагальнених оцінок впливу новинних подій на підвищення рівня соціальної напруженості ускладнюється тим, що відношення читачів різних інформаційних каналів до однієї й тієї самої новини можуть суттєво різнитись. Проблема застосовності методів визначення узгодженості експертних оцінок до задач, що не використовують експертну інформацію, залишається малодослідженою.

Мета дослідження. Розроблення і тестування методу коригування індексу соціальної напруженості на основі методів визначення узгодженості експертних оцінок.

Методика реалізації. Методика реалізації методу коригування індексу соціальної напруженості полягає у взаємодії бази знань системи підтримки прийняття рішень і методу визначення узгодженості експертних оцінок на основі мінімізації суми відстаней між попарно взятими оцінками.

Результати дослідження. Запропоновано метод коригування індексу соціальної напруженості на основі методів визначення узгодженості експертних оцінок. Запропоновано методику визначення порогового значення узгодженості для оцінок впливу новинних публікацій на підвищення соціальної напруженості. У результаті застосування методу коригування індексу соціальної напруженості достовірність результатів оцінювання соціальної напруженості може бути підвищена.

Висновки. Застосування методу коригування індексу соціальної напруженості на основі методів визначення узгодженості експертних оцінок дало можливість підвищити достовірність визначення соціальної напруженості у випадках, коли індекс узгодженості між оцінками впливів новинних подій нижчий за порогове значення узгодженості.

Ключові слова: соціальна напруженість; соціальні мережі; новинна подія; система підтримки прийняття рішень; узгодженість оцінок; достатній для агрегації рівень узгодженості.

Вступ

Соціальна напруженість (СН) є предметом багатьох сучасних соціологічних досліджень, оскільки вона має значний вплив на успішність реалізації прийнятих рішень як на державному рівні, так і в бізнесі. Причиною СН є наявність невірних соціальних протиріч, що проявляються у формі конфлікту думок, інтересів чи цінностей всередині суспільства. Різке зростання рівня СН спостерігається як реакція суспільства на деякі

новинні події, що стосуються предмету протиріччя і порушують встановлений до того баланс.

Щоб визначити динаміку зміни СН, зумовленої новинними подіями, а також ступінь впливу кожної новини на підвищення її рівня, розроблено математичну модель СН, побудовану на аналізі емоційності коментарів із соціальних мереж. Для побудови математичної моделі використано систему підтримки прийняття рішень мережевої структури, яка розраховує індекс СН у кожний момент часу.

Пропозиція для цитування цієї статті: М.О. Щьоголев, В.В. Циганок, «Метод коригування індексу соціальної напруженості на основі методів визначення узгодженості експертних оцінок», Наукові вісті КПІ, № 3, с. 32–41, 2025. doi: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.339188>

Offer a citation for this article: Maksym Shchoholiev, Vitaliy Tsyganok, “A method for adjusting the social tension index based on methods for assessing the consistency of expert estimates”, KPI Science News, no. 3, pp. 32–41, 2025. doi: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.339188>

Однією із проблем, яка виникає у процесі розрахунку цього індексу, є узгоджуваність оцінок, які отримують у результаті аналізу коментарів з різних інформаційних ресурсів (ІР). Причиною виникнення цієї проблеми є відмінності у поглядах читачів різних ІР щодо одних і тих самих новинних подій. Підрахунок узагальненого індексу напруженості на основі оцінок впливів новинних публікацій з низьким ступенем узгодженості може призвести до втрати інформативності цього індексу. Отже, постала проблема розробити методику визначення порогового значення узгодженості для оцінок впливу новинних публікацій на підвищення СН. Порогове значення потрібне для фільтрації тих оцінок впливу новинних публікацій, рівень узгодженості яких досить низький. Низький рівень узгодженості вказує на полярність думок читачів різних ІР, що може потенційно спричинити зростання рівня напруженості, тому наступним постало питання розробити метод коригування індексу СН на основі оцінок впливу новинних публікацій з низьким ступенем узгодженості.

1. Метод визначення соціальної напруженості на основі даних із соціальних мереж

Основними методами визначення рівня СН, які найчастіше використовують сьогодні, є метод соціологічних опитувань і метод статистичних досліджень [1].

Перевагами методу соціологічних опитувань є можливість ставити питання, які прямо стосуються СН, можливість додатково отримати інформацію про респондентів, таку як вік, стать, місце проживання тощо. Найголовнішим недоліком цього методу є те, що результати соціологічних опитувань мають ретроспективний характер. Оскільки рівень СН може швидко змінюватись, а саме опитування та аналіз результатів анкетування потребують певного часу, остаточні результати на момент їх отримання можуть бути вже неактуальними. Важливим недоліком цього методу також є низька часова дискретність, що унеможливорює відстеження швидких коливань рівня напруженості.

Метод статистичних досліджень, що використовує дані переважно державної статистики про рівень безробіття, смертності населення, злочинності тощо, вирізняється тим, що більшість даних для нього є у вільному доступі, і він дозволяє підраховувати індекси напруженості в окремих регіонах країни. Утім, він має низьку суттєвих недоліків, серед яких найважливі-

шими є непрямий характер статистики, тобто дослідження лише факторів, які можуть вплинути на рівень напруженості, а не самі настрої у суспільстві, а також великий часовий розрив між досліджуваним часовим інтервалом і часом публікації аналітичних звітів.

Метод визначення СН на основі даних із соціальних мереж потребує значно більшої технічної підтримки, ніж опитувальні та статистичні методи, але він дозволяє подолати їхні найсуттєвіші недоліки. По-перше, якщо налагоджено механізм збору даних із соціальних мереж в реальному часі, цей метод дозволяє отримувати актуальну інформацію про рівень напруженості в суспільстві з порівняно невеликою затримкою. Завдяки цьому з'являється можливість досліджувати зміну рівня напруженості в динаміці. По-друге, використання даних із соціальних мереж дозволяє автоматизувати процес періодичного визначення рівня СН.

У цій роботі застосовано метод визначення рівня СН, описаний у [2, 3]. Він складається із двох етапів: сентимент-аналізу коментарів із соціальних мереж і підрахунку рівня напруженості в суспільстві на основі оцінок цього сентимент-аналізу.

На першому етапі відбувається збирання даних із соціальних мереж. Вони включають новинні публікації, коментарі до них і метадані, такі як час, інформація про реакції на коментарі, назва ІР тощо. Після цього за допомогою нейронної мережі визначають оцінку емоційності кожного коментаря на інтервалі $[0, 2]$, де 0 – максимум позитивної емоційності, 2 – максимум негативної емоційності. На основі отриманих даних для кожної новинної публікації будують розподіл її коментарів за рівнем емоційності. Ці розподіли для кожної новинної публікації подають на вхід системи підтримки прийняття рішень.

2. Архітектура бази знань системи підтримки прийняття рішень

Система підтримки прийняття рішень (СППР) призначена для визначення ступеня впливу новинних публікацій і новинних подій на підвищення рівня СН, а також для підрахунку загального індексу СН для певного ІР.

База знань розробленої СППР має трирівневу мережеву структуру (рис. 1).

Для кожного ІР будують окрему базу знань.

Усі вузли від 1 до n і від b до k зображують критерії СН. Перший (найнижчий) рівень вуз-

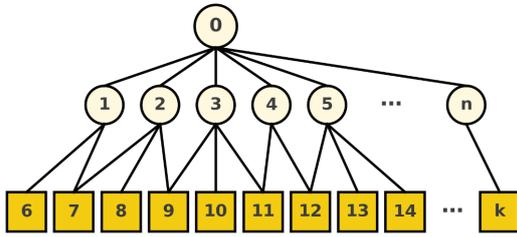


Рис. 1 – Архітектура бази знань СППР

лів, позначений числами від 6 до k , зображує новинні публікації. Другий рівень вузлів, позначений числами від 1 до n , зображує новинні події. Кількість вузлів n і k для різних ІР може бути різною. Вузол з числом 0 зображує головну ціль – підвищення СН.

3. Алгоритм розрахунку індексів соціальної напруженості

Щоб визначити рівень напруженості, розраховують ступінь досягнення головної цілі для кожного ІР. Розрахунок проводять за таким алгоритмом.

1. На основі розподілу оцінок емоційності коментарів для кожної новинної публікації розраховують частковий коефіцієнт впливу (ЧКВ) за формулою:

$$w_j = \sum_{k=1}^n \frac{k}{n} N_k, \quad (1)$$

де w_j – ЧКВ j -ї новинної публікації на новинну подію або події, з якими вона пов'язана; n – кількість рівномірно розподілених оцінок на інтервалі $[0, 2]$; N_k – кількість коментарів, що мають відповідну оцінку емоційності.

2. Частковий коефіцієнт впливу цілей першого рівня (новинних публікацій) нормалізують у групах, що пов'язані з кожною новинною подією.

3. Підраховують ступені досягнення цілей другого рівня (підвищення напруженості, зумовлене новинними подіями) як суми добутків нормалізованих ЧКВ новинних публікацій на коефіцієнти активності користувачів досліджуваної соціальної мережі, які визначають залежно від часу проведення дослідження напруженості:

$$\theta_e = \sum_{j=1}^p w_{e,j} A(t), \quad (2)$$

де θ_e – ступінь досягнення цілі для кожної новинної події e ; $w_{e,j}$ – частковий коефіцієнт впливу j -ї новинної публікації на e -ту новинну подію;

$A(t)$ – коефіцієнт активності користувачів соціальної мережі залежно від часу проведення дослідження; p – кількість публікацій, пов'язаних із e -ю новинною подією.

4. Підраховують ЧКВ цілей другого рівня за формулою, подібною до формули (1):

$$w_e = \sum_{k=1}^n \frac{k}{n} N_k, \quad (3)$$

де w_e – частковий коефіцієнт впливу e -ї новинної події на підвищення рівня напруженості; N_k – загальна кількість коментарів до новинних публікацій, пов'язаних із новинною подією e , що мають оцінку емоційності з номером k .

5. Проводять нормалізацію всіх ЧКВ цілей другого рівня.

6. Підраховують ступінь досягнення головної цілі як суму добутків нормалізованих ЧКВ цілей другого рівня на ступені досягнення цілей другого рівня, тобто

$$\Theta = \sum_{e=1}^E w_e \theta_e = \sum_{e=1}^E v_e, \quad (4)$$

де Θ – ступінь досягнення головної цілі; E – кількість новинних подій, що розглядаються, $w_e \theta_e = v_e$ – внесок події у підвищення СН у межах ІР.

Щоб перейти з рівня одного ІР на рівень загальних оцінок за всіма ІР, треба провести агрегацію значень v_e для кожної цілі другого рівня (новинні події) за всіма ІР, де відповідна подія висвітлювалась у публікаціях. Ступені досягнення цілей другого рівня інтерпретуються як оцінки впливу новинних подій на підвищення рівня напруженості. Під час агрегації враховується вага кожного ресурсу. Будемо вважати, що чим більшу кількість підписників має ресурс, тим більший його вплив на підвищення рівня напруженості. Нехай γ_i – нормалізована до одиничної суми кількість підписників на ІР i . Тоді загальний внесок події у підвищення СН можна підраховувати за формулою

$$\tilde{v}_e = \sum_i v_{e,i} \gamma_i, \quad (5)$$

де \tilde{v}_e – агрегований внесок події e у підвищення рівня СН; $v_{e,i}$ – внесок події e у межах i -го ресурсу.

Тоді для підрахунку загального ступеня досягнення головної цілі за всіма ІР у формулі (4) замість v_e використовують \tilde{v}_e . Цей ступінь досягнення головної цілі інтерпретують як індекс СН у момент часу t .

Оскільки відношення читачів різних ІР до однієї й тієї самої новини можуть суттєво різ-

нитись, рівень узгодженості цих оцінок впливу може бути низьким, що може призвести до зниження достовірності агрегованих оцінок для новинних подій. Рівень узгодженості визначає, чи є доцільним проведення агрегації оцінок впливу.

4. Застосування методу визначення узгодженості експертних оцінок

4.1. Аналіз відомих методів

У роботі [4] проведено порівняння наявних індексів узгодженості експертних оцінок. Автори публікації виділяють такі індекси:

- 1) стандартне відхилення вибірки [5];
- 2) коефіцієнт варіації;
- 3) індекс скоригованого середнього відхилення [6];
- 4) індекси r_{wg} [7] та r_{wg}^* [8];
- 5) індекс a_{wg} [9];
- 6) спектральний показник узгодженості [10];
- 7) зважений індекс спарювання [11];
- 8) критерій узгодженості Пірсона;
- 9) індекс подвійної ентропії [12].

Досліджуючи переваги й недоліки цих індексів, автори доходять висновку, що жодний із них не задовольняє базові вимоги, виконання яких може підвищити достовірність експертиз. До цих вимог входять вимоги про:

- 1) існування «істинної» оцінки під час експертного оцінювання;
- 2) відповідність цієї «істинної» оцінки деякому усередненому значенню множини індивідуальних оцінок експертів;
- 3) можливість подати множину індивідуальних оцінок на обмеженій з обох боків числовій шкалі;
- 4) досяжність максимального рівня узгодженості (1.0) тоді і тільки тоді, коли всі експерти вибрали одну й ту ж саму оцінку;
- 5) незалежність індексу узгодженості від зсувів оцінок;
- 6) про те, що збільшення розміру шкали має призводити до підвищення індексу узгодженості за однієї і тієї самої множини оцінок, і навпаки;
- 7) незалежність від розміру шкали: якщо деяка множина оцінок більш узгоджена, ніж інша у певній шкалі, то вона має бути більш узгодженою і в будь-якій іншій шкалі;
- 8) масштабованість індексу: у разі лінійних змін (одночасного пропорційного збільшення/зменшення) розмірів шкали і значень усіх оцінних індексів узгодженості має залишатись незмінним.

Усі ці вимоги є так само актуальними і для індексів узгодженості, що будуть використані для оцінок впливу новинних подій.

Автори у [4] пропонують власний метод підрахунку індексів узгодженості, що задовольняють усі висунуті вимоги. Індекс підраховують за формулою

$$I = 1 - \frac{\sum_{i \neq j} f(|x_i - x_j|)}{M}, \quad (6)$$

де x_i – оцінка i -го експерта; M – значення для найбільш неузгодженого випадку, тобто таке, що максимізує $\sum_{i \neq j} f(|x_i - x_j|)$, $I \in [0, 1]$. Для функції f мають виконуватись такі вимоги: $f(x) > 0$, якщо $x > 0$, та $f(x) = 0$, якщо $x = 0$. Ці вимоги виконуються, наприклад, для функцій $f(x) = x^2$ та $f(x) = |x|$. Максимального значення індекс I досягає, коли експертів розділяють порівну на дві групи, виставляючи крайні оцінки зі шкали оцінювання, тобто якщо оцінювання проводять на шкалі $[0, s]$, а в оцінюванні беруть участь n експертів, то $I = 0$, коли множина оцінок має вигляд $\left\{ \frac{1 \dots 1}{2}, \frac{s \dots s}{2} \right\}$ за парного n та $\left\{ \frac{1 \dots 1}{\frac{n+1}{2}}, \frac{s \dots s}{\frac{n-1}{2}} \right\}$ або $\left\{ \frac{1 \dots 1}{\frac{n-1}{2}}, \frac{s \dots s}{\frac{n+1}{2}} \right\}$ за непарного n .

4.2. Метод визначення попарної узгодженості експертних оцінок

Концепцію запропонованого у роботі [4] методу можна використовувати для підрахунку індексів узгодженості між оцінками емоційності коментарів, пов'язаних з новинними подіями з різних ІР. Спершу визначимо термінологічні аналогії класичної задачі підтримки прийняття рішень і задачі визначення напруженості в суспільстві. По-перше, роботу експертів, які у класичній задачі оцінюють альтернативні рішення за певною шкалою, у задачі визначення напруженості виконують нейронні мережі, що визначають емоційність коментарів. Утім, формат експертних оцінок суттєво відрізняється: якщо у класичній задачі оцінки – це числові значення з певної заздалегідь визначеної множини, що показують у попарному порівнянні, наскільки одна альтернатива краща за іншу, то у задачі визначення напруженості кожна оцінка – це дискретний розподіл вагових коефіцієнтів для оцінок напруженості на інтервалі $[0, 2]$. По-друге, альтернативам у класичній задачі відповідає вплив деякої новинної події на підвищення рівня напруженості у різних ІР.

Щоб використати запропонований авторами роботи [4] метод для задачі визначення рівня

напруженості, треба відкоригувати формулу (6). При цьому основний зміст вимог до вихідної формули має бути збережений.

На відміну від точкових оцінок, які порівнюють у класичному методі, в адаптованому методі порівнюють пари оцінок з урахуванням ваг. Початково ваги ненормовані, тому спершу потрібно нормалізувати ваги у межах кожного ІР для певної новини за формулою

$$p_i = \frac{w_i(x)}{\sum_z w_i(z)}, \quad (7)$$

де w_i – ваги, що відповідають окремим оцінкам емоційності коментарів; $x \in X$, X – множина дискретних оцінок на шкалі оцінювання коментарів; $\sum_z w_i(z)$ – сума всіх ваг для досліджуваної новини (кількість коментарів, пов'язаних із новинною подією).

Щоб врахувати попарні відмінності, треба масштабувати кожну пару оцінок добутком їхніх нормованих ваг. Вважатимемо також, що $f(x) = |x|$, тоді

$$\delta_{ij} = \frac{1}{R} \sum_x \sum_y p_i(x) p_j(y) |x - y|, \quad (8)$$

де δ_{ij} – парна «несхожість» між оцінками новини на різних ІР; $p_i(x)$, $p_j(y)$ – ваги порівнюваних оцінок новини із двох ІР; x , y – оцінки новин; $R = \max(x) - \min(x)$ – різниця між верхньою та нижньою границями шкали оцінювання. Подвійна сума у формулі (8) досягатиме свого максимуму, коли на одному ІР всі коментарі будуть мати максимальну негативну емоційність, а на іншому – максимальну позитивну. Тоді єдиним ненульовим членом подвійної суми буде елемент з $p_i(x) = 1$ та $p_j(y) = 1$, а $|x - y| = R$, що в результаті дасть найбільше можливе значення $\delta_{ij} = 1$. Через нормування ваг можна відійти від суми модулів різниць абсолютних значень оцінок M , оскільки верхню межу вже закладено у самій формулі.

Усі вимоги, що ставились до індексу узгодженості, заданого формулою (6), виконуються для модифікованих формул (7)–(8).

4.3. Визначення умови фільтрації ресурсів з низьким рівнем узгодженості

Рівень узгодженості вимірюють з метою перевірки можливості проведення агрегації оцінок впливів новинних подій з різних ІР. Якщо рівень узгодженості оцінок для новин з деяких ресурсів суттєво нижчий за інші, ці оцінки не будуть використані під час агрегації, натомість їх вра-

ховуватимуть безпосередньо у загальному внеску новинної події у підвищення рівня СН. Щоб відфільтрувати оцінки, які мають низький рівень узгодженості порівняно з іншими, задають порогові значення.

Перш ніж починати досліджувати рівень узгодженості окремих ІР варто перевірити загальний середній рівень узгодженості між усіма ІР, тобто визначити загальний ступінь поляризації думок. Якщо загальний ступінь поляризації буде високим, то агрегація не буде давати показових результатів.

На основі оцінок δ_{ij} для кожної пари ІР будують матрицю $D_{ij} \in [0, 1]^{K \times K}$; $D_{ij} = 0$. Підрахунок загальної поляризації M проводять за формулою

$$M = \frac{2}{K(K-1)} \sum_{i < j} D_{ij}, \quad (9)$$

де K – кількість досліджуваних ІР, $M \in [0, 1]$.

Якщо припустити, що всі ІР розділились на дві групи із частками π та $1 - \pi$, де π – це мінімальна частка меншої групи, то порогове значення M_t можна розрахувати за формулою

$$M_t = 2\pi(1 - \pi)\delta_{\min}, \quad (10)$$

де $\delta_{\min} \in [0, 1]$ – коефіцієнт мінімальної міжгрупової несхожості, $M_t \in [0, 1]$. Цей коефіцієнт показує мінімальну допустиму несхожість між парою ІР, яку вважатимуть суттєвою для того, щоб визначати думки читачів цих ресурсів як поляризовані. Значення π теж обирають емпірично, воно вказує на мінімальну частку групи ІР, оцінки яких суттєво різняться від інших. Якщо для якоїсь новинної події загальна поляризація оцінок різних ІР більша за порогове значення ($M > M_t$), агрегацію для цієї події не проводять, якщо ж поляризація менша, то проводять аналіз узгодженості усіх ІР.

Щоб визначити середню парну несхожість кожного ресурсу з рештою, розраховують середні значення за рядками матриці D_{ij} за формулою

$$\mu_i = \frac{1}{K-1} \sum_{j \neq i} D_{ij}. \quad (11)$$

Ідея методу визначення неузгоджених ресурсів полягає у тому, щоб дослідити, як вилучення оцінок несхожості одного ІР вплине на загальне значення індексу узгодженості. Якщо значення індексу узгодженості після цього суттєво зросте, це означатиме, що цей ІР мав досить низьку узгодженість з іншими. Оцінки, отримані на основі аналізу цих ІР, не будуть агрегуватись разом з рештою оцінок.

Індекс узгодженості I загалом може бути визначений як $1 - M$. Тоді, якщо позначити через $I_{(-i)}$ значення індексу узгодженості після вилучення ресурсу i , а через ΔI_i зміну індексу узгодженості після цього вилучення, то справедливим буде вираз

$$\begin{aligned} \Delta I_i &= I_{(-i)} - I = (1 - M_{(-i)}) - \\ &- (1 - M) = M - M_{(-i)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Якщо вважати, що $\sum_{i < j} D_{ij} = T$, а $\sum_{i \neq j} D_{ij} = s_i$, то

$$M = \frac{2T}{K(K-1)}, \quad (13)$$

$$M_{(-i)} = \frac{2(T - s_i)}{(K-1)(K-2)}. \quad (14)$$

Отже, з формул (12)–(14) можна отримати формулу

$$\begin{aligned} \Delta I_i &= \frac{2T}{K(K-1)} - \frac{2(T - s_i)}{(K-1)(K-2)} = \\ &= \frac{2}{K-2} \left(\frac{s_i}{K-1} - \frac{2T}{K(K-1)} \right) = \\ &= \frac{2}{K-2} (\mu_i - M), \end{aligned} \quad (15)$$

де $K > 2$.

Якщо $\Delta I_i > 0$, це означає, що вилучення ресурсу підвищує індекс узгодженості, отже, його узгодженість з рештою ресурсів нижча за середнє значення. Утім, для вилучення ресурсу з підрахунку агрегованої оцінки потрібно підібрати додаткове порогове значення, яке дозволить відфільтрувати ресурси з низьким рівнем узгодженості. Для цього введемо поріг τ як частку від оцінки загальної поляризації, яку розраховують за формулою

$$\tau = \frac{2}{K-2} \eta M, \quad (16)$$

де $\eta \in [0, 1]$ – коефіцієнт мінімально значущої частки, що показує мінімальну частку поляризації, яку вважають практично значущою.

Якщо для деякого ресурсу i приріст узгодженості після його вилучення досягне або перевищить значення визначеного порогу ($\Delta I_i > \tau$), то такий ресурс слід вилучати з підрахунку агрегованої оцінки впливу досліджуваної новинної події.

5. Метод коригування індексу соціальної напруженості на основі методів визначення узгодженості експертних оцінок

Підрахунок загального індексу соціальної напруженості без урахування узгодженості між ресурсами може призвести до втрати інформативності значень індексу. Для агрегації оцінок впливу різних новинних подій беруть лише узгоджені між собою оцінки, натомість значення неузгоджених враховують окремо у загальній оцінці впливу новинної події.

Для врахування оцінок неузгоджених ресурсів розглянемо два випадки: 1) коли загальна поляризація в контексті окремої новинної події вища за порогове значення ($M > M_t$), 2) коли рівень узгодженості окремих ІР з іншими досить низький (ресурси i , для яких $\Delta I_i > \tau$). Зауважимо, що ці два випадки вважають такими, що не можуть виконуватись одночасно, тобто якщо рівень поляризації для деякої новинної події перевищує порогове значення, то рівень узгодженості окремих ІР не підраховують, і навпаки, якщо порогове значення для поляризації виконується, проводять дослідження кожного окремого ІР щодо його узгодженості з рештою ресурсів.

Розглянемо перший випадок. Якщо загальна поляризація M_e перевищує поріг M_t , слід визначити, наскільки великим є це перевищення. Для цього розраховують нормований індекс перевищення порога P_e для події e за формулою

$$P_e = \frac{M_e - M_t}{1 - M_t}, \quad (17)$$

де $P_e \in [0, 1]$. Нормований індекс P_e показує частку досягнутого перевищення порога від максимально можливого перевищення.

Якщо загальна поляризація M_e перевищує поріг M_t , агрегацію впливів новинних подій на підвищення СН не підраховують за формулою (5). У цьому випадку застосовують формулу (18) для \tilde{v}'_e , в якій використовують індекс перевищення порога P_e , зважений коефіцієнтом глобального підсилення α :

$$\tilde{v}'_e = \alpha P_e, \quad (18)$$

де α – коефіцієнт глобального підсилення, $\alpha \in [0, 1]$.

Розглянемо другий випадок. Якщо загальна поляризація M_e задовольняє поріг M_t ($M_e \leq M_t$), але деякі ресурси мають низький рівень узгодженості з рештою, спочатку для цих ресурсів підраховують локальний нормований надлишок неузгодженості $s_{e,i}$ за формулою

$$s_{e,i} = \frac{\Delta I_{e,i} - \tau_e}{\frac{2}{K-2}(1 - M_e)}, \quad (19)$$

де $s_{e,i} \in [0, 1]$, $K > 2$. Він показує, наскільки сильно ресурс i для події e перевищує поріг неузгодженості. У чисельнику підраховують відхилення значення $\Delta I_{e,i}$ від τ_e , а у знаменнику – максимально можливе значення $\Delta I_{e,i}$.

Далі знаходять середнє значення C_e локальних нормованих надлишків неузгодженості $s_{e,i}$ для тих ресурсів, які мають низький рівень узгодженості з рештою, за формулою

$$C_e = \frac{1}{K-1} \sum_i s_{e,i}, \quad (20)$$

де $C_e \in [0, 1]$. Отже, що більше буде неузгоджених ІР, то більшим буде значення C_e .

Значення C_e використовують для коригування ступенів досягнення цілей другого рівня, яке проводять за формулою

$$\tilde{v}'_e = \tilde{v}_e + (1 - \tilde{v}_e)\beta C_e, \quad (21)$$

де β – коефіцієнт локального підсилення, $\beta \in [0, 1]$.

Після коригування внесків у підвищення СН тих подій, для яких оцінки новинних ресурсів не мають повної узгодженості, перераховують індекс СН, який під впливом змінених внесків новинних подій теж змінює значення і набуває більшої інформативності.

6. Приклад підрахунку скоригованого індексу соціальної напруженості на основі методу узгодженості експертних оцінок

6.1. Визначення коефіцієнтів для моделі

Для практичного застосування розробленої математичної моделі визначення СН треба визначити константні параметри (коефіцієнти), що їх використовують для підрахунку порогових значень та калібрування чутливості індексів P_e та C_e . До цих параметрів входять:

- δ_{\min} – коефіцієнт мінімальної міжгрупової несхожості;
- π – параметр мінімальної частки меншої групи у моделі з двома групами;
- η – коефіцієнт мінімально значущої частки, що показує мінімальну частку поляризації, яку вважають практично значущою;
- α – коефіцієнт глобального підсилення, коли $M_e > M_i$;

• β – коефіцієнт локального підсилення, коли $M_e \leq M_i$, і для деяких ІР $\Delta I_i > \tau$.

Коефіцієнт δ_{\min} і параметр π використовують для підрахунку порогового значення M_i індексу загальної поляризації M_e за формулою (10). Поріг M_i повинен визначати мінімальний рівень поляризації, який має допускати можливість певного відхилення в оцінках деяких ІР, і одночасно бути достатньо жорстким, щоб відслідковувати поділ оцінок ресурсів на дві групи.

У межах практичної апробації моделі пропонуємо взяти $\delta_{\min} = 0,7$. На шкалі оцінювання емоційності $[0, 2]$ обране значення δ_{\min} буде відповідати оцінці 1,4, тобто відстань між центрами груп на шкалі $[0, 2]$ має бути меншою за 1,4, щоб не перевищувати порогового значення. Це обмеження є досить жорстким, але коли мова йде саме про глобальну поляризацію, воно відповідає очікуванням щодо обмежень.

Значення параметра мінімальної частки меншої групи π пропонуємо взяти рівним 0,25. Він показує, що оцінки будемо вважати поляризованими у тому випадку, якщо щонайменше чверть ІР потрапить в одну групу, а решта – в іншу. Якщо досліджуватимемо, наприклад, 10 ІР, то новинну подію будемо вважати такою, що має поляризовані думки, якщо принаймні для 3 із 10 ІР центр оцінок буде відрізнятись не менше, ніж на 1,4, порівняно з центром решти ресурсів.

Тоді за $\delta_{\min} = 0,7$ й $\pi = 0,25$ відповідно до формули (10) значення порогу M_i буде дорівнювати 0,2625, що відповідає очікуваній жорсткості.

Коефіцієнт мінімально значущої частки η використовують для підрахунку порогу зростання індексу узгодженості з вилученням деякого ресурсу у процесі підрахунку цього індексу. З формул (15)–(16), використавши елементарні перетворення, можна вивести умову

$$\mu_i \geq M(1 + \eta). \quad (22)$$

Отже, $(1 + \eta)$ визначає коефіцієнт, що показує, у скільки разів середня несхожість ресурсу з іншими ресурсами має бути більшою за середню несхожість за всіма ресурсами.

Пропонуємо взяти значення η рівним 1, тобто ресурс будемо вважати таким, що суттєво відрізняється за оцінками емоційності від інших, якщо його середня несхожість з іншими ресурсами буде принаймні вдвічі більшою за середню несхожість за всіма ресурсами.

Коефіцієнт глобального підсилення α визначає ступінь впливу індексу перевищення порога P_e на агрегований внесок події у підвищен-

ня СН \tilde{v}_e , який підраховують за формулою (18) у випадку, коли $M_e > M_r$. Оскільки тут розглядаємо великий ступінь поляризації, пропонуємо взяти $\alpha = 1$. Це дасть можливість за певних обставин агрегованому внеску події \tilde{v}_e досягати значення 1, що має бути допустимим з огляду на можливість максимальної поляризації.

Коефіцієнт локального підсилення β дозволяє підвищити \tilde{v}_e за рахунок оцінок подій, які не використовували під час агрегації через низьку узгодженість із рештою оцінок. Пропонуємо взяти $\beta = 1$. Оскільки C_e майже завжди буде виходити значно ближчим до 0, ніж до 1, коефіцієнт β доцільно взяти максимально великим.

6.2. Приклад підрахунку індексу соціальної напруженості без урахування узгодженості

Для проведення практичного експерименту було змодельовано ситуацію, в якій досліджували рівень соціальної напруженості за даними з 10 ІР. Ці дані являють собою розподіли оцінок коментарів до новинних публікацій, які стосуються 10 новинних подій, причому кожний з розглянутих ІР висвітлив кожен з цих подій у кількох публікаціях. Побудована база знань СППР має мережеву структуру, тому одній новинній публікації можуть відповідати 1–3 новинні події, а кожній новинній події можуть відповідати 5–20 публікацій у межах кожного ІР. Внесок новинної публікації у підвищення СН характеризується оцінками емоційності її коментарів, розподілених на інтервалі $[0,2]$ із кроком 0,5, починаючи від нуля. Загалом було змодельовано унікальні розподіли оцінок емоційності для 940 новинних публікацій на 10 ІР. На основі цих розподілів за алгоритмом розрахунку індексів соціальної напруженості були підраховані внески кожної події у підвищення СН у межах кожного ІР та загальні внески за всіма ІР, а також підраховано ступінь досягнення головної цілі, який інтерпретуємо як загальний рівень СН. Оскільки всі підрахунки проводили в один момент часу t , значення активності користувачів вважали однаковим для всіх ІР й подій. У табл. 1 наведено перелік усіх новинних подій та їх агреговані внески \tilde{v}_e у підвищення СН.

Якщо підрахувати суму всіх значень \tilde{v}_e за формулою (4), то вийде, що для випадку, коли рівень узгодженості між ресурсами не враховували, рівень СН досягає значення $\Theta = 0,857\ 143$.

Таблиця 1. Новинні події та їхні агреговані внески \tilde{v}_e у підвищення соціальної напруженості

Порядковий номер події	Агреговані внески подій \tilde{v}_e
1	0,084 505
2	0,071 029
3	0,042 097
4	0,036 288
5	0,143 665
6	0,163 230
7	0,157 683
8	0,158 646

6.3. Приклад підрахунку індексу соціальної напруженості з урахуванням узгодженості

Щоб забезпечити об'єктивність експерименту, у цьому прикладі розглянемо той самий набір вхідних даних, що і в попередньому прикладі. Утім, агрегований внесок події у підвищення СН підраховуємо за формулою (5) лише тоді, коли загальний рівень поляризації між ІР в межах новинної події M_e не перевищує порогового значення M_r , а приріст узгодженості для кожного ІР не перевищує порога τ . Якщо не виконується умова $M_e \leq M_r$, агрегований внесок \tilde{v}'_e події визначають за формулою (18), якщо ж ця умова виконується, але для деяких ІР у межах новинної події відбувається перевищення приросту узгодженості після вилучення цього ІР ($\Delta I_i > \tau$), тоді агрегований внесок \tilde{v}'_e події знаходять за формулою (21). Розглянемо табл. 2 з результатами експерименту з урахуванням узгодженості, а також результатами попереднього експерименту для порівняння.

У табл. 2 відображено номери подій (№ з/п), загальні рівні поляризації по кожній події (M_e), середні значення локальних нормованих надлишків неузгодженості (C_e), нормовані індекси перевищення порога у випадку високої глобальної поляризації (P_e), агреговані внески подій без урахування узгодженості (\tilde{v}_e) та агреговані внески подій з урахуванням узгодженості (\tilde{v}'_e).

З табл. 2 видно, що значення загального рівня поляризації для подій 1-4 вищі за інші, отже, потенційно внески цих подій у підвищення СН мають бути вищими. Утім, значення агрегованих внесків подій без урахування узгодженості цього не відображають. Навпаки, значення \tilde{v}_e для подій 1-4 нижчі, ніж для подій 5-8. Такий результат

Таблиця 2. Таблиця результатів експерименту з підрахунку індексу соціальної напруженості з урахуванням узгодженості

№ з/п	M_e	C_e	P_e	\tilde{v}_e	\tilde{v}'_e
1	0,55 314 824	0	0,3 940 993 084	0,08 450 464 627	0,3 940 993 084
2	0,5 315 935 961	0	0,3 648 726 727	0,07 102 860 226	0,3 648 726 727
3	0,4 675 525 378	0	0,2 780 373 394	0,04 209 736 551	0,2 780 373 394
4	0,3 615 710 597	0	0,1 343 336 403	0,03 628 827 511	0,1 343 336 403
5	0,1 654 205 798	0	0	0,1 436 654 445	0,1 436 654 445
6	0,1 723 429 566	0	0	0,1 632 295 144	0,1 632 295 144
7	0,1 235 095 482	0	0	0,1 576 834 506	0,1 576 834 506
8	0,1 254 018 918	0	0	0,1 586 455 585	0,1 586 455 585

є наслідком втрати інформативності оцінок під час підрахунків за формулами (3)–(5). Щоб підвищити внески подій з вищим рівнем поляризації, застосовують індекси P_e і C_e . Вище було встановлено, що оптимальним порогом для загальної поляризації буде значення $M_t = 0,2625$. Оскільки для подій 1-4 виконується умова $M_e > M_t$, для цих подій підраховують індекси перевищення порога P_e , які, за $\alpha = 1$, дорівнюють оновленим агрегованим внескам подій \tilde{v}'_e . Індекси C_e можна розраховувати лише коли $M_e \leq M_t$, тобто лише для подій 5-8, але оскільки порогового значення несхожості жодного ІР у межах жодної з цих чотирьох подій не було досягнуто, індекс C_e залишився рівним нулю для всіх подій.

Дані табл. 2 свідчать, що агреговані внески подій з урахуванням узгодженості для подій з високою поляризацією істотно перевищують відповідні внески без урахування узгодженості. Окрім того, порівняно з експериментом без урахування узгодженості оцінка рівня СН виросла до $\Theta = 1,794 567$, що пояснюється врахуванням високої поляризації оцінок ресурсів для деяких новин.

Загалом результати показують дієвість обраного методу і правильність підбору коефіцієнтів для експерименту.

Висновки

1. Запропоновано метод застосування системи підтримки прийняття рішень для визначення індексу СН. Розроблено алгоритм розрахунку індексу СН з використанням математичного апарату систем підтримки прийняття рішень.

2. Проаналізовано відомі методи визначення узгодженості експертних оцінок і запропоновано модифікований метод.

3. Розроблено метод коригування індексу соціальної напруженості на основі методів визначення узгодженості експертних оцінок.

4. Запропоновано методику визначення коефіцієнтів для підрахунку порогових значень поляризації та зміни індексу узгодженості, а також коефіцієнтів локального та глобального підсилення для підрахунку нових агрегованих внесків подій у підвищення СН.

5. Проведено експериментальне дослідження ефективності методу визначення індексу СН із застосуванням методу визначення узгодженості експертних оцінок. Із застосуванням цього методу зафіксовано підвищення індексу соціальної напруженості з 0,857 143 до 1,794 567 за високого рівня поляризації ресурсів у межах деяких новинних подій.

Наступні дослідження будуть присвячені покращенню розробленої математичної моделі СН, її тестуванню на реальних даних, пошуку способів більш гнучкого налаштування параметрів цієї моделі.

References

- [1] O. Rudachenko and T. Klebanova, "Suchasni pidkhody do analizu sotsialnoi napruzhenosti", *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnogo universytetu*. Seria: Mizhnarodni ekonomichni vidnosyny ta svitove gospodarstvo, 2020, no. 30, pp. 140–144.
- [2] O. Andriichuk and M. Shchoholiev, "Zastosuvannia metodiv pidtrymky pryiniattia rishen ta obchysluvalnoi linhvistyky dlia vyznachennia rinvnia sotsialnoi napruzhenosti", *Naukovi notatky*, 2023, pp. 217–224.
- [3] M. Shchoholiev and O. Andriichuk, "Matematychni metody obrobky pryrodnoi movy u systemi operatyvnoho vyznachennia rinvnia napruzhenosti v suspilstvi", *Kibernetyka ta kompiuterni tekhnologii*, 2023, no. 2, pp. 55–68.
- [4] V.V. Tsyhanok and P.D. Roik, "Metod vyznachennia ta pidvyshchennia uzgodzhenosti ekspertnykh otsinok za pidtrymannia pryiniattia hrupovykh rishen", *System Research and Information Technologies*, 2018, no 3, pp. 110–121.
- [5] F.L. Schmidt and J.E. Hunter, "Interrater reliability coefficients cannot be computed when only one stimulus is rated", *Journal of Applied Psychology*, 1989, vol. 74, pp. 368–370.
- [6] M.J. Burke *et al.*, "On average deviation indices for estimating interrater agreement", *Organizational Research Methods*, 1999, vol. 2, pp. 49–68.
- [7] L.R. James *et al.*, "Estimating within-group interrater reliability with and without response bias", *Journal of Applied Psychology*, 1984, vol. 69, pp. 85–98.
- [8] M.K. Lindell *et al.*, "A revised index of agreement for multi-item ratings of a single target", *Applied Psychological Measurement*, 1999, vol. 23, pp. 127–135.
- [9] R.D. Brown and N.M.A. Hauenstein, "Interrater agreement reconsidered: An alternative to the rwg indices", *Organizational Research Methods*, 2005, vol. 8, pp. 165–184.
- [10] M.Z. Zgurovsky *et al.*, "Group incomplete paired comparisons with account of expert competence", *Mathematical and Computer Modelling*, 2004, vol. 39, no 4–5, pp. 349–361.
- [11] G. A new measure of rank correlation, *Biometrika*, 1938, vol. 30, no 1–2, pp. 81–93. Retrieved from: doi: 10.1093/biomet/30.1-2.81.
- [12] A. Olenko and V. Tsyganok, "Double entropy inter-rater agreement indices", *Applied Psychological Measurement*, 2016, vol. 40, no 1, pp. 37–55.

M.O. Shchoholiev, V.V. Tsyganok

A METHOD FOR ADJUSTING THE SOCIAL TENSION INDEX BASED ON METHODS FOR ASSESSING THE CONSISTENCY OF EXPERT ESTIMATES

Problem. Social tension is the subject of numerous contemporary sociological studies due to its significant impact on the effectiveness of decision-making both at the governmental level and in business contexts. Social tension can be assessed by analyzing public reactions to news events in social networks. However, obtaining generalized estimates of the impact of news events on increasing levels of social tension is complicated by the fact that audiences of different information channels may hold significantly different opinions about the same event. The applicability of methods for assessing the consistency of expert estimates to problems that do not involve traditional expert input remains insufficiently studied.

Objective. To develop and test a method for adjusting the social tension index using methods for assessing the consistency of expert estimates.

Methodology of implementation. The implementation of the method for adjusting the social tension index involves the interaction between the knowledge base of a decision support system and a method for assessing the consistency of expert estimates, based on minimizing the total distance between all pairwise estimates.

Results. A method for adjusting the social tension index based on methods for assessing the consistency of expert estimates is proposed. A procedure for determining a threshold consistency level for evaluating the impact of news events on social tension is introduced. Applying the proposed method for adjusting the social tension index makes it possible to improve the validity of social tension assessments.

Conclusions. The application of the proposed method for adjusting the social tension index based on methods for assessing the consistency of expert estimates enhances the validity of social tension assessments in cases where the consistency index among estimates of news event impacts falls below the defined threshold.

Keywords: Social tension; social networks; news event; decision support system; consistency of estimates; an aggregation-adequate level of consistency.

Рекомендована Радою
факультету прикладної математики
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
22 червня 2025 року

Прийнята до публікації
08 вересня 2025 року

DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.337638>

УДК 621.793

Р.В. Педань¹, О.В. Дубіковський^{1,2}, А.В. Боднарук^{1,3}, І.О. Круглов¹,
Ю.В. Яворський¹, І.А. Владимирський^{1*}

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

² Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна

³ Інститут фізики НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: vladymyrskiy@kpm.kpi.ua

СТРУКТУРНО-ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОРОЗМІРНИХ ПЛІВКОВИХ КОМПОЗИЦІЙ НА ОСНОВІ Pt/Co, ОСАДЖЕНИХ НА ГНУЧКІ ПОЛІМЕРНІ ПІДКЛАДИНКИ

Проблематика. Феромагнітні наноплівки на основі Pt/Co викликають інтерес завдяки потенційному застосуванню в спинтроніці та наноелектроніці. Вони поєднують унікальні магнітні властивості, високу корозійну стійкість і сумісність з сучасними технологіями інженерії магнітних засобів збереження інформації та реєстрації електромагнітного випромінювання. Pt/Co плівки досліджують та застосовують як матеріали для сенсорів, тунельних переходів, магнітних дисків, ТГц-генераторів та скірімйонних носіїв. Вивчення формування їх властивостей є ключовим завданням для розвитку технологій наноелектроніки.

Мега дослідження. Встановити зміни фазового складу, перерозподілу хімічних елементів за товщиною та магнітних властивостей нанорозмірних плівкових композицій на основі Pt/Co, осаджених на гнучкі полімерні підкладки полііміду і підданих наступній термічній обробці у високому вакуумі, при додаванні проміжних шарів Au та формуванні різної кількості міжшарових меж поділу.

Методика реалізації. Наноплівки Pt/Co/Pt, Pt/Au/Co/Pt та Pt/Co/Au/Pt/Co/Pt осаджували на гнучкі поліімідні підкладки методом магнетронного розпорощення за кімнатної температури. Після осадження їх відпалювали у вакуумі за 550 °C протягом 30 хв. Для дослідження структурно-фазових змін використовували методи РФА та мас-спектрометрії, а дослідження магнітних властивостей проводили за допомогою методу вібраційної магнітометрії у зовнішньому магнітному полі.

Результати дослідження. Встановлено, що відпал нанорозмірних композицій за температури 550 °C упродовж 30 хв. спричиняє формування дуже малих кристалів, що найбільш імовірно пов'язано з релаксацією напружень, що виникли у плівкових композиціях у процесі осадження. З результатів мас-спектроскопії встановлено, що в результаті відпалу спостерігається рівномірний розподіл інтенсивності виходу вторинних іонів металів, що входять до складу плівкових композицій, та комплексного іона Co/Pt, що вказує на гомогенізацію складу плівкових композицій внаслідок відпалу. З результатів дослідження магнітних властивостей встановлено, що відпал дозволяє досягти магнітно-твердого стану плівкового матеріалу, а його коерцитивна сила демонструє виражену залежність від вихідної структури композиції.

Висновки. Встановлено, що термічна обробка нанорозмірних композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм), Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм) та Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм) на підкладках полііміду за температури 550 °C упродовж 30 хв. дозволяє досягти магнітно-твердого стану плівкового матеріалу, при цьому його коерцитивна сила виявляє виражену залежність від структури вихідної композиції – наявності додаткового шару Au та кількості міжшарових меж поділу.

Ключові слова: нанорозмірна плівкова композиція; гнучка полімерна підкладка; РФА, мас-спектрометрія; намагніченість; коерцитивна сила.

Пропозиція для цитування цієї статті: Р.В. Педань, О.В. Дубіковський, А.В. Боднарук, І.О. Круглов, Ю.В. Яворський, І.А. Владимирський, “Структурно-фазові перетворення та магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій на основі Pt/Co, осаджених на гнучкі полімерні підкладки”, Наукові вісті КПІ, № 3, с. 42–49, 2025. doi: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.337638>

Offer a citation for this article: Pedan R.V., Dubikovskiy O.V., Bodnaruk A.V., Kruhlov I.O., Yavorskiy Yu.V., Vladymyrskiy I.A., “Structural-phase transformations and magnetic properties of nanoscale Pt/Co-based thin film compositions deposited on flexible polymer substrates”, KPI Science News, no. 3, pp. 42–49, 2025. doi: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.337638>

Вступ

Феромагнітні нанорозмірні плівкові матеріали на основі Pt/Co викликають постійний інтерес дослідників з огляду на можливість їх практичного використання як функціональні шари пристроїв спінтроніки та наноелектроніки, що обумовлено їхнім унікальним комплексом магнітних властивостей, вираженою корозійною стійкістю та суміжністю з сучасними технологічними процесами [1, 2]. Зокрема, плівкові сплави системи Co–Pt розглядаються як матеріали для магніторезистивних сенсорів, пристроїв, що працюють на основі ефектів магнітних тунельних переходів та переносу спин-орбітального моменту, жорстких магнітних дисків, генераторів електромагнітного випромінювання терагерцового діапазону та носіїв інформації на основі скірміонів [3–19].

Основним методом отримання нанорозмірних феромагнітних плівок на основі Pt/Co є осадження сплаву відповідного хімічного складу на нагріті підкладки [20–24] або осадження сплаву за кімнатної температури з проведенням наступної термічної обробки [25–28]. Альтернативним підходом є послідовне нанесення окремих шарів Co і Pt з подальшим термічним впливом, який ініціює дифузійно-індуковане формування інтерметалідних фаз [6, 13, 29]. У таких нанорозмірних структурах термічно індукована дифузійна взаємодія між шарами Co та Pt може забезпечити формування низки феромагнітних фаз, зокрема, магнітно-м'яких AI -CoPt, LI_2 -Co₃Pt та LI_2 -CoPt₃ з гранецентрованою кубічною ґраткою та магнітно-твердої LI_0 -CoPt з гранецентрованою тетрагональною структурою. Особливістю останнього підходу є можливість формування феромагнітних плівкових матеріалів за відносно невисоких температур обробки шляхом розвитку дифузійних процесів за домінуючим зернограничним механізмом [13]. Більше того, формування наперед заданої структури завдяки дифузії границями зерен у нанорозмірних плівках має додаткові переваги, оскільки подібні матеріали характеризуються високою протяжністю цих границь [30].

Також відомо, що введення до складу нанорозмірних плівкових композицій додаткових проміжних шарів благородних металів, наприклад Au, а також збільшення кількості міжшарових меж розділу може обумовлювати виникнення додаткових механічних напружень, які слугують екстра рушійною силою розвитку дифузійних процесів і, як наслідок, сприяють ди-

фузійно-контрольованому формуванню заданого структурно-фазового стану [31–33].

Застосування фізико-матеріалознавчих підходів, які дозволяють досягти зниження температур формування феромагнітних фаз у плівкових композиціях на основі Pt/Co, є необхідним для застосування цих матеріалів у технологіях «гнучкої» електроніки [34, 35]. Однак створення пристроїв спінтроніки на основі плівок Pt/Co, осаджених на гнучкі підкладки, потребує ґрунтовного дослідження закономірностей розвитку дифузійних процесів і перебігу контролюваних ними структурно-фазових перетворень саме за відносно невисоких температур відпаду, що обумовлено низькою термічною стабільністю полімерних підкладок.

У цій роботі подано результати дослідження термічно-індукованої зміни фазового складу, перерозподілу хімічних елементів за товщиною та магнітних властивостей плівкових композицій на основі Pt/Co з додатковими шарами Au і різною кількістю меж поділу, осаджених на гнучкі полімерні підкладки полііміду.

Методика дослідження

Нанорозмірні плівкові композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI, Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI, Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI осаджено на гнучкі полімерні підкладки полііміду (PI) за кімнатної температури з використанням методу магнетронного розпорошення. Осадження здійснювалося шляхом послідовного розпорошення окремих мішеней Pt, Co і Au високої чистоти (99,9 %). Процес осадження відбувався з використанням живлення магнетрону у режимі змінного струму для розпорошення мішені Co, а Au та Pt – у режимі постійного струму зі швидкостями осадження 2 Å/с для Co, 1,5 Å/с для Pt та 4 Å/с для Au. Тиск у вакуумній камері перед осадженням становив 5×10^{-8} мБар, тиск інертного газу Ar, що подався у камеру для утворення плазмового розряду під час осадження, становив 8×10^{-4} мБар. Після осадження досліджувані плівкові композиції піддано термічному відпаду у вакуумі за тиску 10^{-6} мБар за температури 550 °C упродовж 30 хв.

Структурно-фазовий аналіз плівкових зразків після осадження та термічної обробки проведено з використанням методу рентгенівської дифракції за допомогою дифрактометру Rigaku Ultima IV у геометрії Бреґґа-Брентано θ – 2θ із застосуванням джерела Cu-K α -випромінювання. Дифрак-

ційні спектри зареєстровано для кутів дифракції 2θ ($20^\circ - 60^\circ$) з кроком $0,02^\circ$ та часом витримки у точці зйомки – 2 с за робочої напруги джерела випромінювання 30 кВ та струму 20 мА.

Для дослідження закономірностей термічно-індукованого перерозподілу хімічних елементів за товщиною пліткових композицій використано метод мас-спектрометрії вторинних іонів за допомогою приладу Ion ToF IV, обладнаного часопролітним мас-аналізатором. Розпорошення пліткових композицій відбувалося пучком первинних іонів Cs^+ з енергією 2 кеВ.

Магнітні характеристики пліткових об'єктів досліджено за кімнатної температури методом вібраційної магнітометрії у зовнішньому магнітному полі напруженістю до 1 кЕ, яке прикладалося паралельно та перпендикулярно відносно поверхні зразка.

Аналіз отриманих результатів

На рис. 1 та рис. 2 подано дифрактограми пліткових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI, Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI, Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI у вихідному стані після осадження та після термічної обробки у вакуумі за температури 550°C упродовж 30 хв., відповідно.

Дифрактограми пліткових зразків у вихідному стані характеризуються наявністю дифракційних максимумів з кутовим положенням $2\theta = \sim 39,5^\circ$, що відповідають відбиттю від кристалічної площини 111 шару Pt. Також на дифрактограмах наявний набір дифракційних макси-

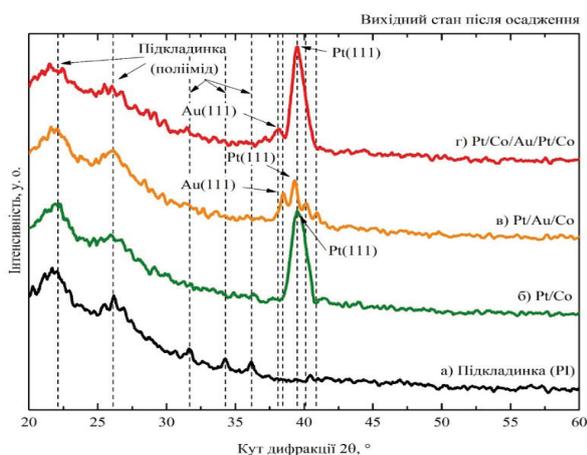


Рис. 1. Дифрактограми підкладинки поліімиду (а) та пліткових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI (б), Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI (в), Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI (г) у вихідному стані після осадження

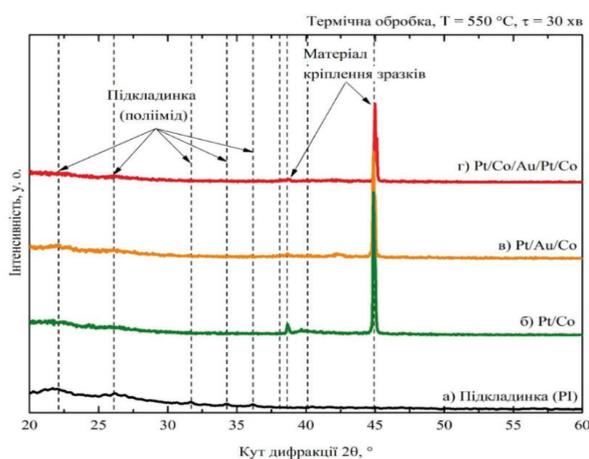


Рис. 2. Дифрактограми підкладинки поліімиду (а) та пліткових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI (б), Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI (в), Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI (г) після відпалу у вакуумі за температури 550°C упродовж 30 хв

мумів, що є характерними для поліімиду, який використано як підкладинку. Дифракційний максимум Au(111) з кутовим положенням $2\theta = \sim 38,2^\circ$ наявний на дифрактограмах пліткових композицій, до складу яких входить проміжний шар Au. Відсутність дифракційних максимумів від Co пояснюється високим коефіцієнтом поглинання цим металом рентгенівського випромінювання $\text{Cu-K}\alpha$, що використане для рентгеноструктурних досліджень.

Внаслідок термічної обробки у вакуумі за температури 550°C упродовж 30 хв. спостерігається зниження інтенсивності дифракційних максимумів, характерних для матеріалу підкладинки. Хоча формування феромагнітних фаз системи Co-Pt внаслідок термічної обробки за аналогічних фізико-технологічних параметрів доведено попередніми дослідженнями пліткових композицій Pt/Co на підкладках SiO_2/Si [13, 33], на дифрактограмах термічно оброблених пліткових композицій всіх досліджених типів не виявлено виражених дифракційних максимумів як від вихідних шарів Pt, Au чи Co, так і від інтерметалідних фаз, що можуть утворюватися у процесі термічно-індукованої взаємодії матеріалів цих шарів. Відсутність дифракційних максимумів як від сформованих фаз Co-Pt, так і від матеріалу проміжного шару Au може бути спричинена формуванням у процесі термічного впливу кристалітів, розмір яких забезпечує таку інтенсивність відбитого кристаліграфічними площинами рентгенівського випромінювання, яка перебуває за межею чутливості використаного у досліджен-

ні обладнання. Причина ймовірного формування кристалітів малого розміру може бути пов'язана з релаксацією напружень, що виникли у плівкових композиціях у процесі осадження. Варто зауважити, що дифракційні максимуми з кутівими положеннями $2\theta \sim 38,7^\circ$ та $\sim 44,9^\circ$ сформовано в результаті взаємодії рентгенівського випромінювання з кюветою тримача зразків, використання якої є необхідним для забезпечення їх плоскої форми після відпалу.

Концентраційні профілі розподілу хімічних елементів за товщиною плівкових композицій, отримані методом мас-спектрометрії вторинних іонів (рис. 3), підтверджують наявність шаруватої структури плівкових композицій у вихідному стані після осадження (рис. 3, *a, в, д*). Цей результат добре узгоджується з дослідженням плівкових зразків методом рентгеноструктурного аналізу, результати якого вказують на наявність на відповідних спектрах дифракційних максимумів від окремих металів, які входять до складу досліджуваних плівкових композицій. Підвищення інтенсивності емісії комплексного іона CoPt в області межі поділу між шарами Co та Pt на профілі розподілу хімічних елементів плівкової композиції $\text{Pt}(10 \text{ нм})/\text{Co}(10 \text{ нм})/\text{PI}$ (рис. 3, *a*)

пов'язане з шорсткістю поверхні поділу між відповідними шарами та не свідчить про перебіг процесів масопереносу під час магнетронного осадження плівкової композиції.

Характерним для профілів розподілу хімічних елементів за товщиною плівкових композицій, підданих термічному впливу, є рівномірний розподіл інтенсивності виходу вторинних іонів металів, що входять до складу плівкових композицій, та комплексного іона CoPt , що вказує на гомогенізацію складу плівкових композицій внаслідок відпалу. Втім, на профілі розподілу елементів плівкової композиції $\text{Pt}(10 \text{ нм})/\text{Co}(10 \text{ нм})/\text{PI}$ (рис. 3, *б*) спостерігається зниження інтенсивності сигналу від вторинного іону Co в області, що відповідає початковому положенню шару Pt .

Магнітні властивості досліджуваних плівкових композицій у вихідному стані після осадження мають анізотропний характер (рис. 4). Вільного намагнічування спрямована паралельно до площини всіх досліджених плівкових композицій (рис. 4, *a, б, в*). Варто зауважити, що така поведінка магнітних властивостей є типовою для магнітних нанорозмірних плівок та обумовлена анізотропією форми. Ферромагнітна пове-

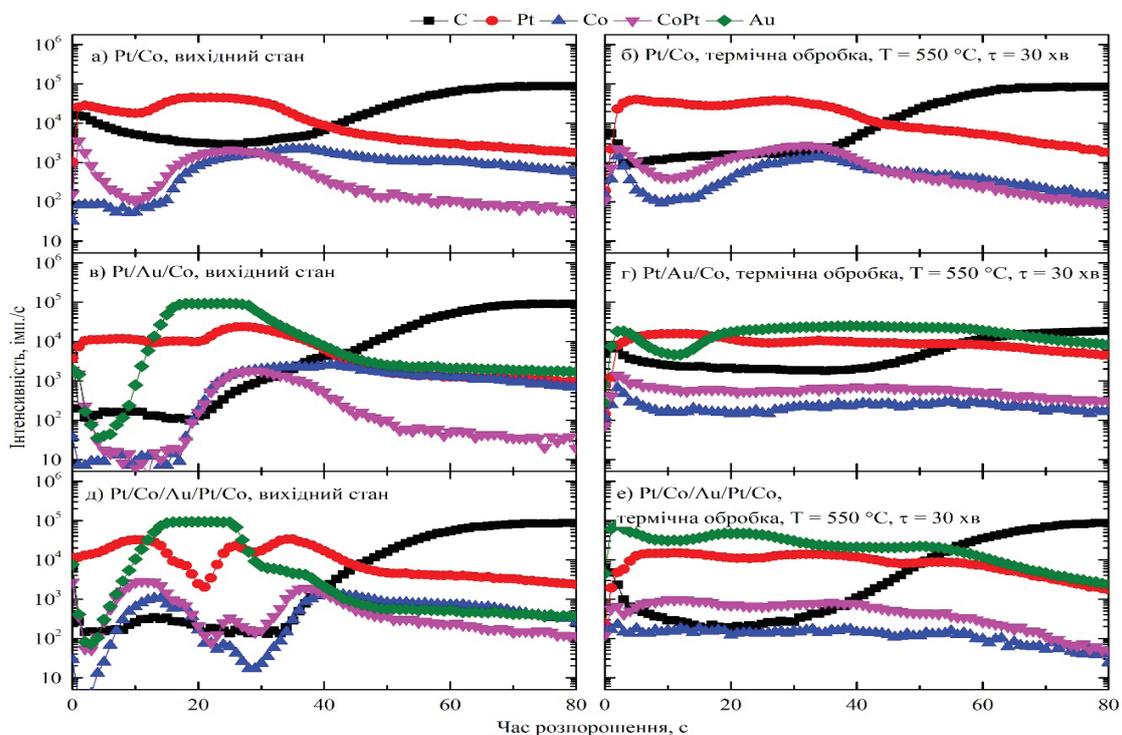


Рис. 3. Профілі розподілу хімічних елементів за товщиною плівкових композицій $\text{Pt}(10 \text{ нм})/\text{Co}(10 \text{ нм})/\text{PI}$ (*a, б*), $\text{Pt}(10 \text{ нм})/\text{Au}(4 \text{ нм})/\text{Co}(10 \text{ нм})/\text{PI}$ (*в, г*), $\text{Pt}(5 \text{ нм})/\text{Co}(5 \text{ нм})/\text{Au}(4 \text{ нм})/\text{Pt}(5 \text{ нм})/\text{Co}(5 \text{ нм})/\text{PI}$ (*д, е*) у вихідному стані після осадження та після відпалу у вакуумі за температури $550 \text{ }^\circ\text{C}$ упродовж 30 хв

дінка плівкових об'єктів дослідження у вихідному стані після осадження зумовлена наявністю у їхньому складі окремого шару Co.

Структурно-фазовий стан плівкових композицій обумовлює їхні магнітні властивості, зокрема величину коерцитивної сили. Найбільше її значення у вихідному стані до термічної обробки – 205 Е – отримано для композиції Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI (рис. 5). Різний рівень напружень, що виникають на межах поділу між шарами плівкових композицій, впливає на дефектність структури, а також на розмір кристалітів і, як наслідок, – на протяжність мережі границь зерен, що впливають на характер обмінної міжзеренної взаємодії феромагнітного матеріалу та може призводити до збільшення коерцитивної сили. Аналіз параметрів ґратки матеріалів шарів досліджуваних плівкових композицій (табл. 1) [36] засвідчив, що невідповідність параметрів кристалічної будови, та, як наслідок, викликані нею механічні напруження у шарі Co є більшими для випадку, коли шар Co має межу розділу з проміжним шаром Au, порівняно з випадком, коли на шар Co осаджено шар Pt у двошаровій плівковій композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI. Розподіл феромагнітного Co у складі плівкової композиції

Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI у вигляді двох шарів завтовшки 5 нм навпаки призводить до зменшення значення коерцитивної сили до 65 Е (рис. 5), хоча кількість феромагнітного матеріалу залишається незмінною.

Внаслідок термічної обробки спостерігається суттєва зміна коерцитивної сили досліджуваних плівкових матеріалів (рис. 4, 5). Хоча дослідження методом рентгеноструктурного аналізу не дозволило отримати однозначної інформації щодо фазового складу композицій, підданих термічному впливу, зафіксоване збільшення коерцитивної сили переконливо свідчить про перебіг процесів термічно-індукованої взаємодії між шарами та формування феромагнітної фази CoPt. Це твердження задовільно корелює з результатами пошарового хімічного аналізу, які вка-

Таблиця 1. Параметри кристалічної ґратки шарів Co, Pt та Au [36]

Матеріал	Параметр кристалічної ґратки, Å	
	<i>a, b</i>	<i>c</i>
Co	2,507	4,069
Pt	3,924	3,924
Au	4,078	4,078

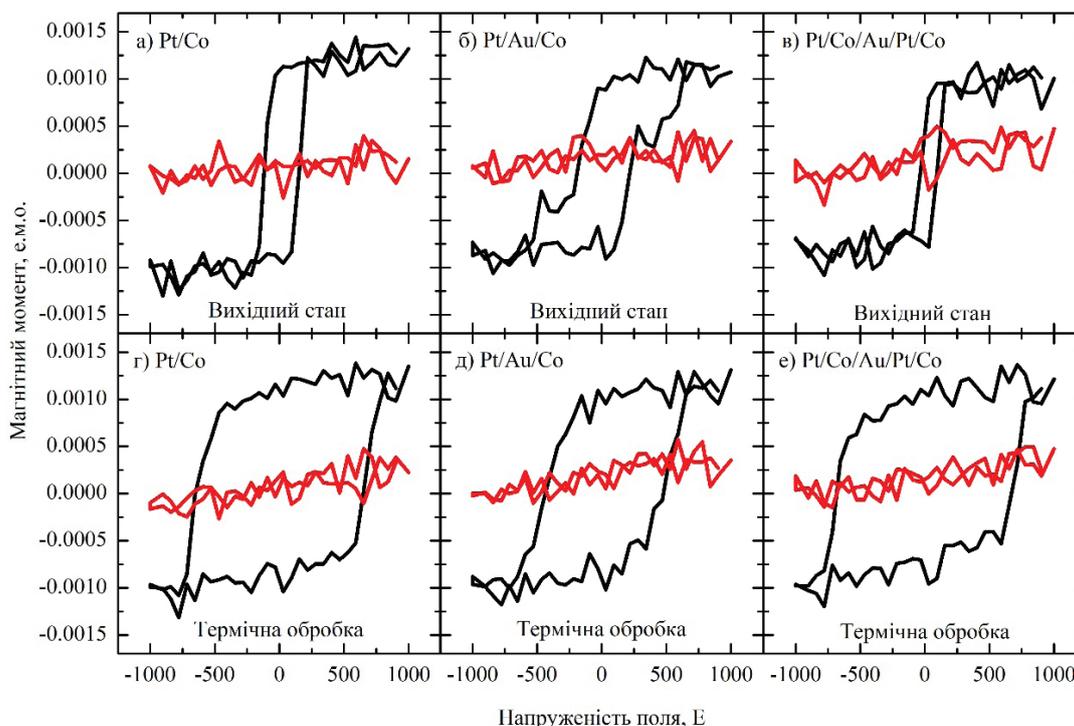


Рис. 4. Польові залежності намагніченості плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI (а, г), Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI (б, д), Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI (в, е) у вихідному стані після осадження та після відпалу у вакуумі за температури 550 °С упродовж 30 хв

зують на гомогенізацію складу плівкових композицій внаслідок термічної обробки. Характер магнітної анізотропії лишається незмінним – вісь легкого намагнічування знаходиться паралельною площині плівкових зразків (рис. 4, з, д, е). Хоча введення проміжного шару парамагнітного Au та подальша його локалізація у межах зерен, сформованих внаслідок термічної обробки фаз на основі Co-Pt, повинна сприяти пригніченню обмінної взаємодії між зернами та збільшенню коерцитивної сили [33], серед термічно оброблених плівкових композицій найменшим значенням цього параметра (461 Е) характеризується композиція Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI (рис. 5). Значення коерцитивної сили двошарової композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI є проміжним та складає 648 Е, що ймовірно пов'язано з нерівномірним розподілом Co, виявленим пошаровим хімічним аналізом методом мас-спектрометрії вторинних іонів. Такий розподіл феромагнітного матеріалу призводить до формування значної магнітної неоднорідності, яка спричиняє зростання коерцитивної сили, та ймовірно пов'язана з співіснуванням у складі плівки кристалітів Co та сформованої феромагнітної фази CoPt.

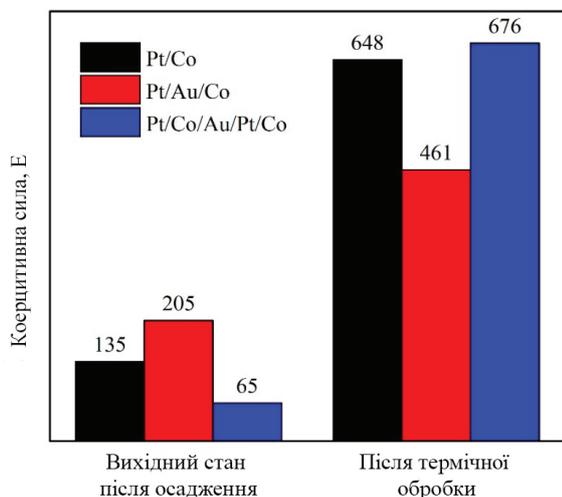


Рис. 5. Коерцитивна сила плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI, Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI та Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI у вихідному стані після осадження та після відпалу у вакуумі за температури 550 °C упродовж 30 хв

References

- [1] A. Hafarov *et al.*, “L10 ordered thin films for spintronic and permanent magnet applications”, *Modern Magnetic and Spintronic Materials. NATO Sci. Peace Secur. B: Phys. Biophys.*, 2020, pp. 73–94. doi.org/10.1007/978-94-024-2034-0_4
- [2] A.E. Hafarov *et al.*, “Nanoscale Materials for State-of-the-Art Magnetic Memory Technologies”, *Uspehi Fiziki Metallov*, 2021, vol. 22, no. 2. pp. 175–203. URL: <https://doi.org/10.15407/ufm.22.02.175>

Хоча у вихідному стані плівкова композиція Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI характеризується найменшою порівняно з іншими дослідженими композиціями коерцитивною силою, внаслідок термічної обробки її значення зростає до 676 Е (рис. 5). Імовірно причиною такого зростання є те, що по чергове нанесення шарів Pt та Co і збільшення кількості меж поділу за збереження сталюю загальної товщини плівкової композиції сприяє гомогенізації складу плівкової композиції та формуванню феромагнітної фази CoPt. Розподіл Au, виявлений методом мас-спектрометрії вторинних іонів, у плівковій композиції Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI відрізняється від того, що зафіксовано для композиції Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI, що вказує на можливий вплив і цього чинника на значення коерцитивної сили.

Висновки

Досліджено закономірності перебігу термічно-індукованих структурно-фазових перетворень та їх вплив на магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій на основі Pt/Co з додатковим шаром Au і різною кількістю міжшарових меж поділу, осаджених на гнучкі підкладки полііміду. Встановлено, що термічна обробка нанорозмірних композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм), Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм) та Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм) на підкладках полііміду за температури 550 °C упродовж 30 хв. дозволяє досягти магнітно-твердого стану плівкового матеріалу, при цьому його коерцитивна сила виявляє виражену залежність від структури вихідної композиції – наявності додаткового шару Au та кількості міжшарових меж поділу. Ці результати представляють практичний інтерес для формування новітніх матеріалів, перспективних для практичного використання в сучасних високих технологіях «гнучкої» наноелектроніки.

Подяка

Дослідження виконано в межах науково-дослідної роботи за фінансової підтримки МОН України (Державний реєстраційний номер: 0123U101257).

- [3] D. Araki *et al.*, “Ultrathin CoPt alloy films with fcc (111) orientation and perpendicular magnetic anisotropy fabricated by electrodeposition”, *Electrochemistry Communications*, 2025, pp. 107938. URL: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2025.107938>
- [4] G.D. Yüzüak, “Modifying the magnetic characteristics of ferrimagnetic TbFeCo by adjusting the thickness of the L11-ordered CoPt”, *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, vol. 1020, pp. 179366. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179366>
- [5] R. Walia *et al.*, “Swift heavy ions induced transformations in the structural and magnetic properties of Co/Pt multilayer thin films for magnetic storage”, *Inorganic Chemistry Communications*, 2024, pp. 113376. URL: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113376>
- [6] R. Toyama *et al.*, “Large anomalous Nernst conductivity of L10-ordered CoPt in CoPt composition-spread thin films”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2024, vol. 57, no. 40. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad460e>
- [7] T. Thi Be Lan *et al.*, “Huge Giant-Magnetoresistance of Co/Ru/L11-CoPt Multi-layer Pseudo-Spin Valve”, *Journal of Alloys and Compounds*, 25 March 2023, vol. 938, pp. 168441. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168441>
- [8] S. Qiu *et al.*, “Magneto-transport properties of perpendicular magnetization CoPt/VO2 bilayer films grown on glass substrate”, *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 436, pp. 128312. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128312>
- [9] T. Fan *et al.*, “Ultrahigh efficient spin orbit torque magnetization switching in fully sputtered topological insulator and ferromagnet multilayers”, *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06779-3>
- [10] Y.N. Dong *et al.*, “Room temperature manipulation of exchange bias in magnetic heterojunctions”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, vol. 559, pp. 169546. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169546>
- [11] A. Mahendra *et al.*, “Tailoring of magnetic anisotropy by ion irradiation for magnetic tunnel junction sensors”, *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 910, pp. 164902. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164902>
- [12] S. Gupta *et al.*, “Approaching barrier-free contacts to monolayer MoS2 employing [Co/Pt] multilayer electrodes”, *NPG Asia Materials*, 2021, vol. 13, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41427-021-00284-1>
- [13] R. Pedan *et al.*, “Homogenization and short-range chemical ordering of Co-Pt alloys driven by the grain boundary migration mechanism”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, vol. 55, no. 40, pp. 405004. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac8204>
- [14] G. Basina *et al.*, “Low-Platinum-Content Exchange-Coupled CoPt Nanoalloys with Enhanced Magnetic Properties”, *Nanomaterials*, 2024, vol. 14, no. 6, 13 p. URL: <https://doi.org/10.3390/nano14060482>
- [15] Z.W. Li *et al.*, “Microstructure and Magnetic Properties of Exchange-Coupled Co72Pt28/Pt/Co81Ir19 Composite Media for Perpendicular Magnetic Recording”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2019, vol. 32, no. 7, pp. 2229–2233. URL: <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4953-8>
- [16] W. Li *et al.*, “Primitive exchange coupling in CoPt/MnN layered structures: Exchange coupling established during deposition”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, vol. 538, pp. 168331. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168331>
- [17] T. Thi Be Lan *et al.*, “Huge Giant-Magnetoresistance of Co/Ru/L11-CoPt Multi-layer Pseudo-Spin Valve”, *Journal of Alloys and Compounds*, 25 March 2023, vol. 938 P. 168441. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168441>
- [18] Y. Liu *et al.*, “Efficient Orbitronic Terahertz Emission Based on CoPt Alloy”, *Advanced Materials*, 2024. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.202404174>
- [19] L. Yang *et al.*, “Field-Free Memristive Spin–Orbit Torque Switching in Al CoPt Single Layer for Image Edge Detection”, *Advanced Electronic Materials*, 2024. URL: <https://doi.org/10.1002/aelm.202300885>
- [20] J. SZHVYS *et al.*, “CoPt/TiN films nanopatterned by RF plasma etching towards dot-patterned magnetic media”, *Applied Surface Science*, 2018, vol. 435, pp. 31–38. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.062>
- [21] J. Ewing *et al.*, “High-current-density electrodeposition using pulsed and constant currents to produce thick CoPt magnetic films on silicon substrates”, *AIP Advances*, 2018, vol. 8, no. 5, P. 056711. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5007272>
- [22] H. An *et al.*, “Highly (001) oriented L10-CoPt/TiN multilayer films on glass substrates with perpendicular magnetic anisotropy”, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2015, vol. 33, no. 2, P. 021512. URL: <https://doi.org/10.1116/1.4905847>
- [23] A.-C. Sun *et al.*, “Evolution of structure and magnetic properties of sputter-deposited CoPt thin films on MgO(111) substrates: Formation of the L11 phase”, *Scripta Materialia*, 2009, vol. 61, no. 7, pp. 713–716. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.06.011>
- [24] A.-C. Sun, “Huang C.-F. Microstructure study of CoPt thin film with phase change from Al1 → L11 → Al1 → L10”, *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, no. 17, P. 17C110. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4799526>
- [25] Y.J. Zhang *et al.*, “Effects of annealing temperature, atomic composition, film thickness on structure and magnetic properties of CoPt composite films”, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, no. 2, pp. 326–331. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.020>
- [26] T. Young Lee *et al.*, “High post-annealing stability in [Pt/Co] multilayers”, *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, no. 21, P. 216102. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4809130>
- [27] S.T. Lim *et al.*, “Effect of different seed layers with varying Co and Pt thicknesses on the magnetic properties of Co/Pt multilayers”, *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 117, no. 17, P. 17A731. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4916295>

- [28] A. Markou *et al.*, “Formation of L10 with (001) texture in magnetically annealed Co/Pt multilayers”, *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 110, no. 8, P. 083903. URL: <https://doi.org/10.1063/1.3651380>
- [29] R. Toyama *et al.*, “Formation of L10-ordered CoPt during interdiffusion of electron-beam-deposited Pt/Co bilayer thin films on Si/SiO₂ substrates by rapid thermal annealing”, *Materials Research Express*, 2020, vol. 7, no. 6, P. 066101. URL: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab934a>
- [30] D.L. Beke *et al.*, “Interdiffusion along grain boundaries – Diffusion induced grain boundary migration, low temperature homogenization and reactions in nanostructured thin films”, *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 98, P. 625–674. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.07.001>
- [31] I.A. Vladymyrskyi *et al.*, “Low-temperature formation of the FePt phase in the presence of an intermediate Au layer in Pt / Au / Fe thin films”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, vol. 49, no. 3, P. 035003. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/3/035003>
- [32] G.L. Katona *et al.*, “Diffusion and solid state reactions in Fe/Ag/Pt and FePt/Ag thin-film systems”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, vol. 48, no. 17, P. 175001. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/17/175001>
- [33] R. Pedan *et al.*, “Low-temperature diffusion in thin-film Pt-(Au)-Co heterostructures: a structural and magnetic characterization”, *Nanotechnology*, 2024, URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ad22a8>
- [34] P. Makushko *et al.*, “Flexible Magnetoreceptor with Tunable Intrinsic Logic for On-Skin Touchless Human-Machine Interfaces”, *Advanced Functional Materials*, 2021, vol. 31, no. 25, P. 2101089. URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.202101089>
- [35] X. Bao *et al.*, “Flexible Exchange-Biased Films with Superior Strain Stability”, *Advanced Functional Materials*, 2024. URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.202409844>
- [36] W.B. Pearson and G.V. Raynor, “Handbook of Lattice Spacings and Structures of Metals and Alloys: International Series of Monographs on Metal Physics and Physical Metallurgy”, vol. 4, *Elsevier Science & Technology Books*, 2013.

Pedan R.V., Dubikovskiy O.V., Bodnaruk A.V., Kruhlov I.O., Yavorskyi Yu.V., Vladymyrskyi I.A.

STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS AND MAGNETIC PROPERTIES OF Pt/Co-BASED NANOSCALE THIN FILM COMPOSITIONS DEPOSITED ON FLEXIBLE POLYMER SUBSTRATES

Background. Ferromagnetic Pt/Co -based nanofilms remain a focal point of interest owing to their potential applications in spintronics and nanoelectronics. These films combine distinctive magnetic properties, exceptional corrosion resistance, and compatibility with modern technologies utilized in magnetic information storage devices and electromagnetic radiation detection. Pt/Co films are studied and applied as materials for sensors, tunnel junctions, magnetic disks, THz generators, and skyrmion carriers. Investigating the formation of their properties is a key task for advancing nanoelectronic technologies.

Objective. The paper aims to assess the alterations in phase composition, depth distribution of chemical elements, and magnetic properties of Pt/Co-based nanofilm compositions deposited on flexible polyimide substrates and subsequently subjected to heat treatment in a high-vacuum environment, while incorporating Au interlayers and forming varying numbers of interfacial boundaries.

Methodology. Pt/Co/PI, Pt/Au/Co/PI, and Pt/Co/Au/Pt/Co/PI nanofilms were deposited on flexible polyimide substrates using magnetron sputtering at ambient temperature. After deposition, the samples were annealed in vacuum at 550 °C for 30 minutes. Structural and phase changes were studied using X-ray diffraction (XRD) and mass spectrometry, while magnetic properties were examined using vibrating sample magnetometry (VSM) in an external magnetic field.

Results. It has been established that annealing nanoscale compositions at a temperature of 550 °C for 30 minutes leads to the formation of very small crystallites, most likely associated with the relaxation of stresses that arise in the film compositions during deposition. Mass spectrometry results indicate that annealing results in a uniform distribution of the intensity of secondary ion emission from the constituent metals of the film compositions, as well as from the complex Co/Pt ion, which points to the homogenization of the film compositions' structure as a consequence of annealing. Magnetic property studies have shown that annealing enables the formation of a magnetically hard state in the film material, while its coercivity demonstrates a pronounced dependence on the initial structure of the composition.

Conclusions. It has been established that thermal treatment of nanoscale compositions Pt(10 nm)/Co(10 nm), Pt(10 nm)/Au(4 nm)/Co(10 nm), and Pt(5 nm)/Co(5 nm)/Au(4 nm)/Pt(5 nm)/Co(5 nm) deposited on polyimide substrates at 550 °C for 30 minutes allows achieving a magnetically hard state in the film material. At the same time, its coercivity shows a strong dependence on the structure of the initial composition specifically, the presence of an additional Au layer and the number of interlayer interfaces.

Keywords: nanoscale film composition; flexible polymer substrate; XRD, mass spectrometry; magnetization; coercivity.

Рекомендована Радою
навчально-наукового інституту матеріалознавства
та зварювання імені Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського

Ндійшла до редакції
21 червня 2025 року

Прийнята до публікації
04 серпня 2025 року

DOI: 10.20535/kpissn.2025.3.333074

УДК 669.245:621.763

С.М. Волошко¹, А.П. Бурмак¹, М.М. Ворон^{1,2},
Н.В. Франчік^{1*}, Я.Г. Фурманюк¹

¹ КПП ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

² Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: nataliia.franchik@gmail.com

АНІЗОТРОПІЯ МІКРОСТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ SLM-СПЛАВУ INCONEL 718

Проблематика. Застосування адитивних технологій, зокрема селективного лазерного плавлення (SLM), відкриває нові можливості для виготовлення деталей складної геометричної форми. Проте специфіка процесу 3D-друку зумовлює цілу низку технологічних проблем. Дослідження механізмів мікроструктурної еволюції під час SLM є необхідним для оптимізації технологічних режимів та забезпечення надійної й довговічної експлуатації надрукованих виробів у різних галузях промисловості.

Мета дослідження. Визначення особливостей мікроструктури та розподілу мікротвердості у різних площинах SLM-сплаву Inconel 718, а також порівняльний аналіз фазового складу, текстури і рівня макроскопічних напружень.

Методика реалізації. Застосовано комплекс методик – металографію, скануючу електронну мікроскопію, мікродюрOMETричний та рентгенофазовий аналіз.

Результати дослідження. Виявлено та охарактеризовано анізотропію мікроструктури SLM-сплаву Inconel 718, яка формується під час 3D-друку в результаті послідовного затвердіння басейнів розплаву. Показано значну варіативність значень мікротвердості у різних площинах – як наслідок анізотропії структури та фазового складу.

Висновки. Встановлено кількість основної γ -фази та зміцнюючих γ' - і γ'' -фаз, а також карбиду NbC. Обговорено фактори, які впливають на анізотропію залишкових напружень та текстури, включно з напрямком теплового потоку, швидкістю охолодження, повторним нагрівом шарів та орієнтацією зерен, що утворюються.

Ключові слова: Inconel 718; селективне лазерне плавлення; мікроструктура; мікротвердість; фазовий склад; текстура; напруження.

Вступ

Нині метод SLM є технологією, яка найбільш швидко розвивається порівняно із іншими методами адитивного виробництва. SLM дозволяє виготовляти вироби із складною геометрією та рельєфними поверхнями за допомогою багаторазового пошарового нанесення дрібнодисперсного металевого порошку та його розплавлення під впливом потужного лазерного променя, який сканує поверхню за визначеною траєкторією. Ця технологія може замінити традиційні методи виробництва, оскільки дозволяє

одержувати вироби, які за фізико-механічними властивостями переважають металопродукцію, створену за стандартними технологіями [1–3].

SLM-технологію застосовують у різних галузях промисловості: в оборонній, космічній, авіа- та ракетобудуванні, медицині та в енергетичному машинобудуванні [4–6].

Суперсплав Inconel 718 – це важливий високотехнологічний металевий матеріал для промисловості через свої виняткові властивості [7–10]. До них належать такі: відмінні вогнетривкі, корозійні і зносостійкі характеристики як за підвищених, так і за низьких температур.

Пропозиція для цитування цієї статті: Пропозиція для цитування цієї статті: С.М. Волошко, А.П. Бурмак, М.М. Ворон, Н.В. Франчік, Я.Г. Фурманюк, “Анізотропія мікроструктури та властивостей SLM-сплаву Inconel 718”, *Наукові вісті КПП*, № 3, с. 50–59, 2025. doi: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.333074>

Offer a citation for this article: S.M. Voloshko, A.P. Burmak, M.M. Voron, N.V. Franchik, Ya.H. Furmaniuk, “Anisotropy of microstructure and properties of SLM alloy Inconel 718”, *KPI Science News*, no. 3, pp. 50–59, 2025. doi: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.333074>

Тому зі сплавів типу Inconel виготовляють велику кількість виробів, таких як камери згоряння, лопатки турбін, ракетні двигуни та ядерні реактори.

Як відомо, механічні характеристики таких виробів істотно залежать від їх структурно-фазового стану, який є досить складним. Матрицю сплаву Inconel 718 утворює γ -твердий пересичений розчин з ГЦК-граткою, який містить значну кількість елементів, серед яких Fe, Cr, Mo та Nb [11]. Внаслідок легування матеріалу Nb зміцнення здійснюється за рахунок виділення дисперсних частинок γ' -фази (Ni_3Nb , ОЦТ-гратка). Вторинними зміцнюючими елементами є Al і Ti, які зумовлюють формування впорядкованої ГЦК γ' -фази (Ni_3Al або Ni_3Ti), а також δ -фази (Ni_3Nb , орторомбічна гратка), карбідів та карбонітридів [12–14]. Вважається, що порівняно з домішками алюмінію та титану, ніобій значно підвищує стійкість до тріщиноутворення.

Стандартний процес термічної обробки для сплаву Inconel 718 включає етап гомогенізації, етап термообробки гартуванням на твердий розчин і завершальну стадію старіння (згідно з AMS 5383) [8]. За температур вище 650 °C або тривалій витримці матеріалу γ' -фаза трансформується на δ - $\text{Ni}_3(\text{Nb},\text{Ti})$ -фазу, що призводить до зниження міцності та повзучості матеріалу [15]. Однак невелика кількість δ -фази по межах зерен є додатковим джерелом зернограничного зміцнення на додаток до основних зміцнювальних фаз, що покращує тим самим пластичність матеріалу під час розтягування [16].

Активна сегрегація ніобію та молібдену у міждендритному просторі зумовлює формування підвищеної кількості топологічно щільноупакованої фази Лавеса ($\text{Ni}, \text{Cr}, \text{Fe})_2(\text{Nb}, \text{Mo}, \text{Ti})$ і карбідів першого МС та другого М6С5, М23С6 типу [17–18].

Нині сплав Inconel 718 для більшості застосовувань виготовляється із використанням традиційних металургійних технологій – лиття, кування та термічної обробки, однак упродовж останнього десятиліття активно розробляються і технології його адитивного виробництва. Внаслідок високих швидкостей охолодження адитивні технології здатні знижувати сегрегацію елементів і створювати умови для формування дрібнозернистої структури, що є критично важливим аспектом для жароміцних нікелевих сплавів та виготовлених з них відповідальних виробів.

Однак для деталей зі сплаву Inconel 718, як і для більшості інших матеріалів, отриманих

методом SLM, характерна неоднорідність мікроструктури та властивостей, що зумовлено особливостями термічного циклу процесу пошарового виготовлення. Напрямки росту кристалів, текстура, залишкові напруження і пористість значною мірою залежать від орієнтації 3D-друку, що, у свою чергу, може істотно впливати на механічні характеристики готових виробів [19].

Дослідження показали, що у процесі SLM-сплаву Inconel 718 формуються переважно стовпчасті зерна з текстурою $\langle 001 \rangle$, які орієнтовані вздовж напрямку нарощування. Це призводить до анізотропії механічних властивостей, зокрема міцності та пластичності. Крім того, орієнтація побудови впливає не тільки на мікроструктуру і механічні властивості, а і на корозійну стійкість [20]. І навіть після термічної обробки залишкова анізотропія може зберігатися через особливості первинної мікроструктури та текстури, сформованої під час SLM [21].

Розуміння природи цієї анізотропії є необхідною умовою для прогнозованого проектування деталей, оптимізації параметрів друку і режимів термічної обробки. У зв'язку з цим, дослідження анізотропії структури та властивостей сплаву Inconel 718, виготовленого методом SLM, з метою виявлення ключових факторів, що визначають її характер, та розробки рекомендацій для покращення однорідності матеріалу, представляють значний науковий і практичний інтерес.

Метою цієї роботи є визначення особливостей мікроструктури та розподілу мікротвердості у різних площинах (перпендикулярно та паралельно до напрямку побудови) адитивно виготовленого зразка сплаву Inconel 718 простої геометричної форми (паралелепіпед), а також порівняльний аналіз фазового складу, текстури і рівня сформованих під час SLM-друку макроскопічних напружень.

Матеріали та методи дослідження

Зразки сплаву Inconel 718 густиною 8,19 г/см³ виготовлено у вигляді паралелепіпеду розмірами 20×10×5 мм за технологією SLM на принтері Alfa-150D компанії «АЛТ України». Схема 3D-друку та технологічні характеристики використаного принтеру наведені у [22].

Як вихідний матеріал використовувався сферичний порошок сплаву Inconel 718 з номінальним розміром частинок від 15 мкм до 45 мкм.

Для виготовлення зразків були використані такі параметри: швидкість сканування 500 мм/с, товщина шару 25 мкм і відстань штрихування 150 мкм. Для запобігання окисненню виготовлення зразків проводилось в інертному середовищі Аг.

Хімічний склад сплаву Inconel 718 (ваг. %): Al 0,2–0,8; Ta ≤ 0,05; Cr 17–21; Cu ≤ 0,3; Mo 2,8–3,3; Nb 4,75–5,5; O ≤ 0,03; S ≤ 0,015; Ti 0,6–1,2; Si ≤ 0,35; C 0,02–0,08; Co ≤ 1; Mn ≤ 0,35; Ni 50–55; N ≤ 0,025; P ≤ 0,015 [23].

Дослідження мікроструктури проведено за допомогою металографічного тринокулярного мікроскопу iScore IS.1053-PLMi. Для цього поліровані зразки піддавали електролітичному травленню за 1...2 В постійного струму реактивом Лукаса [24]. Використано також скануючий електронний мікроскоп TESCAN Vega3 SBH SEM. Визначення мікротвердості за методом Віккерса проведено із використанням приладу LHSV-1000Z із навантаженням 100 г (рис. 1).

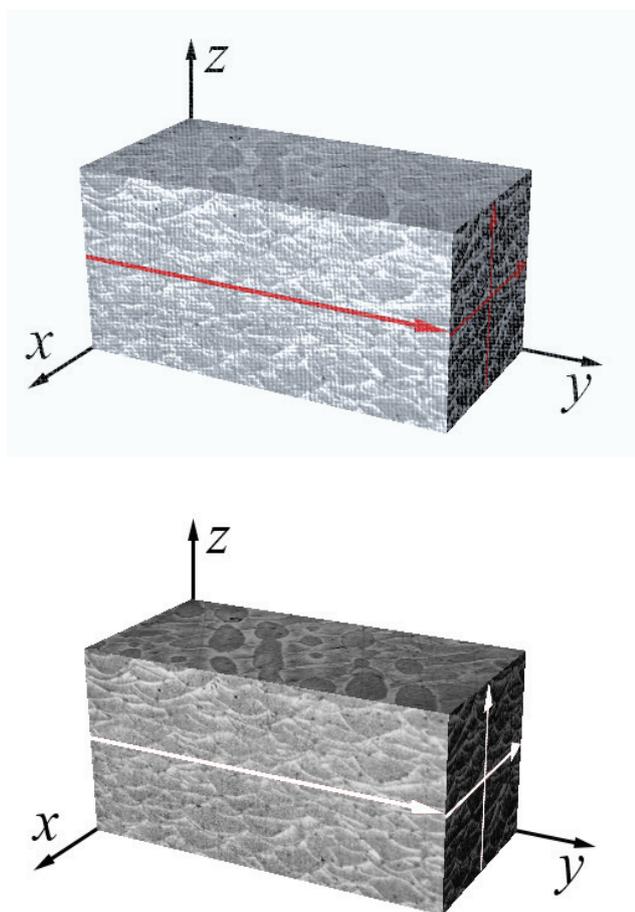


Рис. 1. Схема зразка і напрямки вимірювання мікротвердості (показані стрілками)

Для рентгеноструктурних досліджень використано дифрактометр Rigaku Ultima IV (випромінювання $\lambda K\alpha$ -Cu): інтервал кутів $2\Theta = 20^\circ - 100^\circ$, крок реєстрації – $0,04^\circ$, час витримки в точці – 2 с. Визначення величини напружень першого роду проведено методом $\sin^2\psi$ за зміною кутового положення дифракційних максимумів (220) та (311) для значень кутів $\psi = 0^\circ, -10^\circ, -20^\circ, -30^\circ, -40^\circ$.

Аналіз переважної кристалографічної орієнтації проведено за допомогою побудови прямих полюсних фігур у режимі $\theta-2\theta$ з фіксацією дифракційного максимуму (111) за $2\theta \approx 43,57^\circ$, із використанням геометрії на відбиття та застосуванням щілини Шульца. Вимірювання проведено за допомогою варіювання кутів нахилу зразка (α) від 15° до 90° , з кроком $2,5^\circ$, та азимутального обертання (β) від 0° до 360° , з кроком $2,5^\circ$.

Аналіз отриманих результатів

Мікроструктуру поверхні зразка сплаву Inconel 718, отриманого за технологією SLM, подано на рис. 2.

Під час виготовлення сплаву Inconel 718 методом SLM мікроструктура набуває специфічних особливостей через високі градієнти температур, швидкісне охолодження (до 106 К/с) та пошаровий характер формування. В напрямку yz спостерігаються періодичні напівсферичні басейни застиглої розплаву (рис. 2, а, в, д), що виникають під час процесу лазерного оплавлення порошку після нанесення кожного шару [25]. Ця морфологія виникає внаслідок того, що лазерний промінь локально нагріває порошковий шар до температури вище точки плавлення (приблизно 1350°C), у результаті чого утворюється ванна розплаву. Перекриття суміжних лазерних треків, коли кожен новий басейн розплаву частково перекриває попередній, зумовлює формування напівсферичних слідів з вираженими межами твердіння. У результаті формується серія шарів, що в перетині нагадують «черепицю» або «луску», з кроком, який відповідає відстані між треками лазера. Ширина окремих «лусочок» коливається в діапазоні приблизно 70–100 мкм, а глибина складає приблизно 45–75 мкм (рис. 2, д).

На відміну від цього, у площині xz спостерігаються витягнуті, переривчасті та переплетені зерна у напрямку побудови зразка та перпендикулярні до розплавлених шарів (рис. 2, б, г, е).

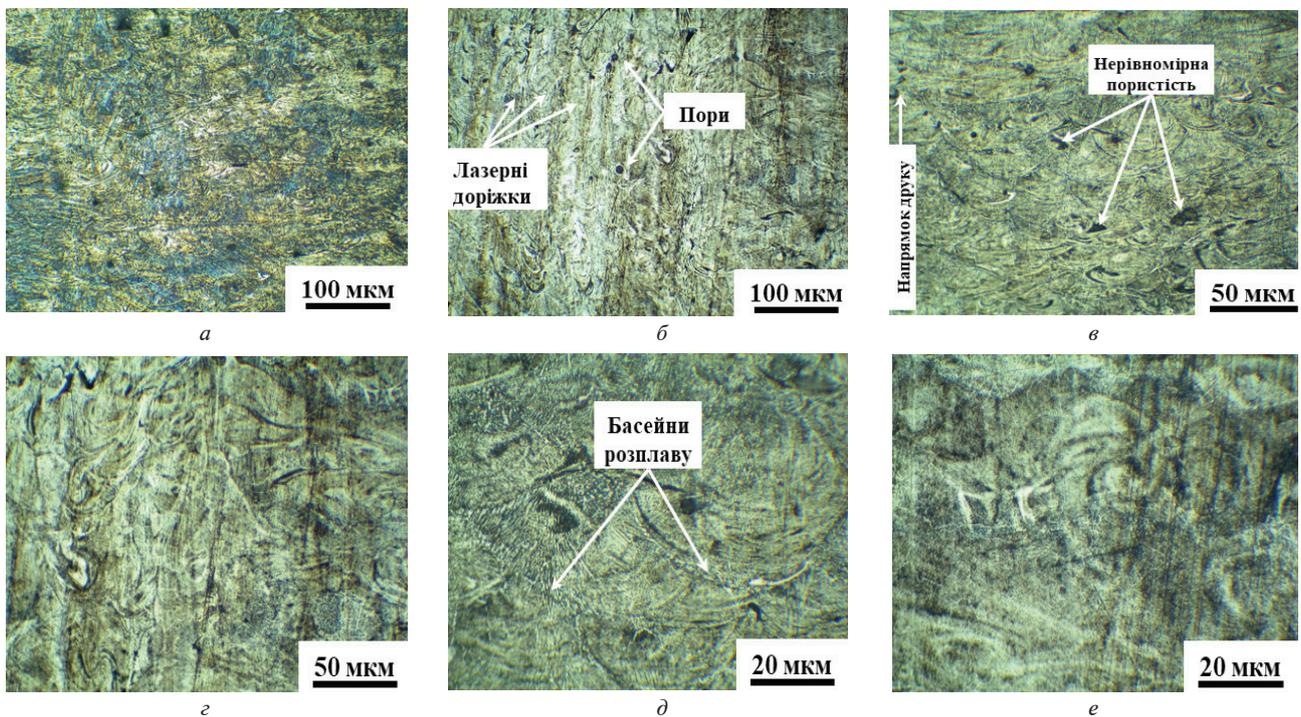


Рис. 2. Мікроструктура SLM-сплаву Inconel 718: *a, в, д* — площина yz ; *б, г, е* — площина xz

У зонах перекриття між суміжними басейнами виникають ділянки, які піддаються повторному нагріванню, що зумовлює перекристалізацію частини вже сформованої структури, і, ймовірно, може впливати на її гомогенність. У місцях неповного перекриття формуються пори (рис. 2).

Однак міжкристалічних тріщин, що зазвичай утворюються під час зварювання матеріалу такого типу й подальшого швидкого охолодження, і можуть негативно впливати на експлуатаційні характеристики виробу, в цьому разі не виявлено. Орієнтаційні залежності мікротвердості зразка сплаву Inconel 718 досліджено на розрізаному вздовж вертикальної осі зразка після полірування. Мікротвердість визначалась від одного краю зразка до іншого з інтервалом 50 мкм на всіх площинах сканування, а також за усією шириною зразка у площині сканування xz . Зміна мікротвердості у різних площинах зразка (рис. 3) має немонотонний характер, пов'язаний з наявністю різних мікроструктурних зон, зумовлених процесами лазерного плавлення і твердіння.

Значення мікротвердості у площині xz змінюються в інтервалі від 2,94 ГПа до 3,65 ГПа (рис. 3, *a*). Найбільше значення мікротвердості досягається на відстані від краю зразка до 1,5 мм. Це може бути пов'язане з локальним виділенням у цій зоні зміцнюючих фаз, таких як γ'

та γ'' , що утворюються після охолодження. Хоча у багатьох дослідженнях [26] крайові області мають меншу мікротвердість через інтенсивніше охолодження без повторних термічних циклів, внаслідок чого формується більш пориста структура.

Під час вимірювання мікротвердості у площині xz , але в перпендикулярному напрямку, динаміка зміни мікротвердості схожа, хоча і має деякі відмінності (рис. 3, *б*). Найбільше значення мікротвердості — 3,41 ГПа виявляється по краях зразка, що можливо через накопичення карбідів, які підвищують твердість матриці. Така причина зазначається як найбільш ймовірна для зразків після гарячого ізотермічного пресування [27].

Під час вимірювання мікротвердості у площині yz значення змінюються від 3,17 ГПа до 4,29 ГПа (рис. 3, *в*). Найменша мікротвердість фіксується по краях зразка. Про це також повідомляє Стівенс та ін. [28]. Також порівняно з площиною xz , середнє значення мікротвердості збільшується на 14 %. Це може бути пов'язано з тим, що для площини yz характерна стовпчаста морфологія зерен, і тому індентор тисне вздовж зерен, що складніше деформуються. Також у площині xz можливі області між треками лазера, де відбувається неповне сплавлення порошку.

Звертають на себе увагу значні коливання мікротвердості. Аналогічні результати для

SLM-сплаву Inconel 718 отримані й іншими авторами.

Під час вимірювання мікротвердості у площині xu , але в перпендикулярному напрямку, динаміка зміни мікротвердості схожа, хоча і має деякі відмінності (рис. 3, б). Найбільше значення мікротвердості – 3,41 ГПа виявляється по краях зразка, що можливо через накопичення карбідів, які підвищують твердість матриці. Така причина зазначається як найбільш ймовірна для зразків після гарячого ізотермічного пресування [27].

Наприклад, у [25] зазначається, що у приповерхневій області (до 200 мкм) мікротвердість коливається від 288 HV до 320 HV, глибше в лазерно-ураженій стовпчастій зоні розкид результатів збільшується, змінюючись від 240 HV до 380 HV, але найбільші варіації мікротвердості від 211 HV до 445 HV спостерігаються у перехідній зоні межі басейну розплаву (МБР) через складну взаємодію ефектів плавлення, затвердіння та формування зони термічного впливу.

За межами перехідного шару виявлено вищу та стабільнішу мікротвердість 330–380 HV. Зниження мікротвердості в межах лазерно-розплавленого шару, ймовірно, пояснюється укрупненням мікроструктури.

За даними [29] поблизу МБР значно зменшується вміст неметалевих елементів, включаючи C, O, Si, тобто неметалеві елементи у цій перехідній зоні перебувають у нестабільному стані та легко видаляються під час процесу травлення зразків для електронно-мікроскопічних досліджень. Нестабільний стан неметалевих елементів поблизу МБР має зворотний вплив на механічні властивості. Через комбінований несприятливий вплив «зони крупного зерна» та нестабільних елементів, МБР мають ще гірші властивості порівняно з вихідними межами зерен, і таким чином негативно впливають на механічні властивості деталей, отриманих SLM.

Дифрактограми від площин uz та xu для зразка сплаву Inconel 718 наведено на рис. 4. Для обох площин характерна наявність дифракційних максимумів від γ -фази (Ni, просторова група Fm-3m), однак розподіл інтенсивностей відображає наявність орієнтаційної текстури, яка формується внаслідок нерівномірного тепловідведення у напрямку нарощування шарів (вісь z).

Найбільш інтенсивний дифракційний максимум $\gamma(200)$ реєструється для площини xu , що свідчить про переважну орієнтацію кристалів у напрямку (200) уздовж осі росту. Цей

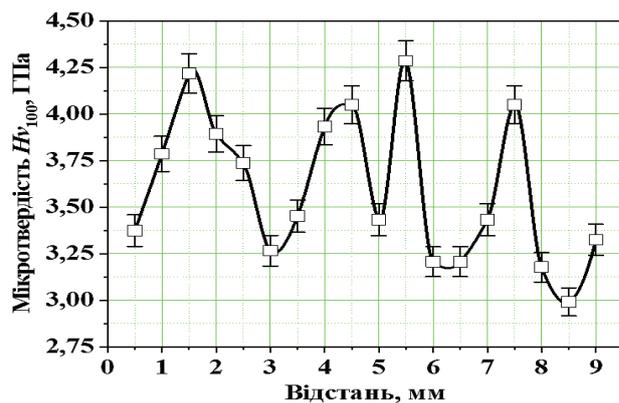
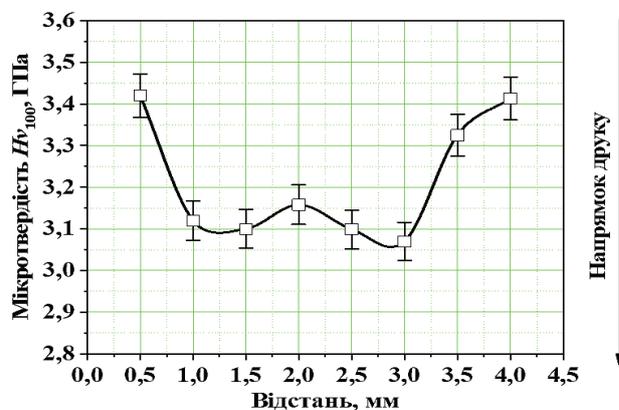
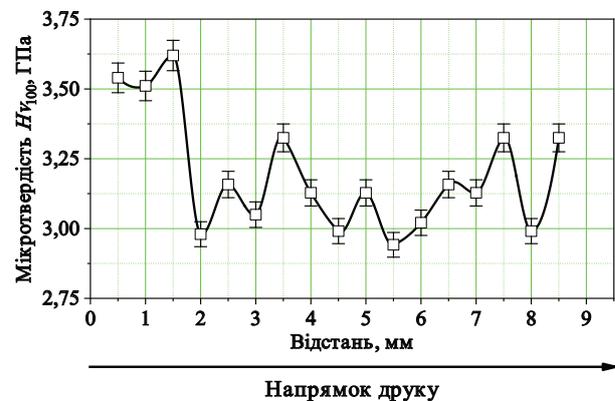


Рис. 3. Мікротвердість сплаву Inconel 718: а — площина xu ; б — площина xu (в перпендикулярному напрямку); в — площина uz

напрямок вважається енергетично найсприятливішим для ГЦК-структури у процесі швидкої направленої кристалізації [30, 31]. Натомість для площини uz відносно більшу інтенсивність

має рефлекс $\gamma(111)$, що вказує на іншу текстурну компоненту для площини, яка є перпендикулярною до напрямку нарощування. На вставці до рис. 4 наведено частину дифрактограми в діапазоні кутів $2\theta = 30^\circ\text{--}55^\circ$, яка дозволяє виявити слабо виражені дифракційні максимуми від зміцнювальних фаз – Ni_3Nb (γ''), Ni_3Al (γ'), а також карбідів NbC. Хоча інтенсивність цих максимумів є відносно низькою, їх наявність підтверджує формування дисперсних частинок зміцнювальних фаз, що відіграють ключову роль у зміцненні сплаву та впливають на його термостійкість [32–34].

Відсутність дифракційних максимумів δ -фази (Ni_3Nb) може бути пов'язана з особливостями SLM-процесу, а саме через надзвичайно високу швидкість охолодження (до 10^6 К/с), яка обмежує розвиток дифузійно-керованих фазових перетворень. Натомість за таких умов охолодження переважає метастабільна γ'' -фаза (тетрагональна Ni_3Nb), яка ефективно зміцнює сплав [30]. Подібний хімічний склад мають δ -та γ'' -фаза, що свідчить про конкуренцію між ними за наявності Nb. Крім того, можливе утворення δ -фази в нанорозмірному стані або локалізація її вкраплень переважно на границях зерен, що ускладнює її ідентифікацію методом рентгеноструктурного аналізу через низьку інтенсивність або перекриття дифракційних максимумів із γ -фазою [32].

Слід зазначити, що фази Лавеса, які зазвичай наявні як евтектичні мікроскладові, не спостерігаються в мікроструктурі SLM-сплаву Inconel 718. Пригнічення утворення цих інтерметалідних фаз характерне для SLM [25, 35].

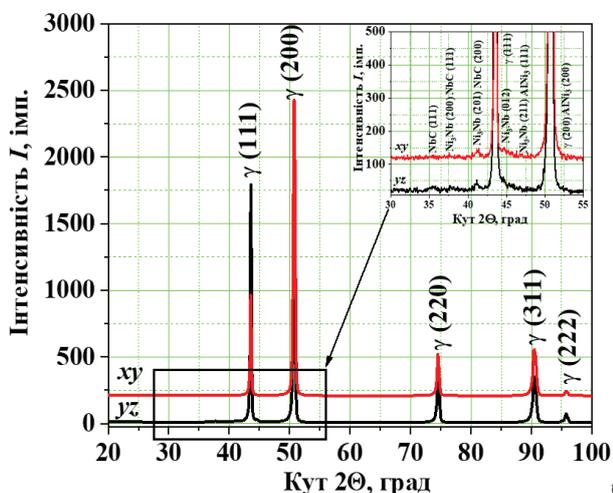


Рис. 4. Дифрактограми сплаву Inconel 718

За результатами рентгеноструктурних досліджень визначено якісний та кількісний фазовий склад сплаву Inconel 718, ступінь деформації кристалічної ґратки та розмір областей когерентного розсіювання (ОКР). Спостерігається яскраво виражена анізотропія як за фазовим складом, так і за іншими параметрами у площинах xu та uz (табл. 1). Основною фазою є γ -фаза, її вміст становить 86 % у площині uz та 92 % у площині xu . Проте навіть у межах цієї фази спостерігається деяка відмінність ступеня деформації ГЦК-ґратки відповідно 0,20 % та 0,28 %.

Щодо зміцнювальних фаз, то їх загальна кількість більша для напрямку uz , що добре узгоджується із більшими значеннями мікротвердості. Для фаз Ni_3Nb (γ'') та Ni_3Al (γ') виявляється відмінність як їх вмісту, так і ступеня мікродеформації та розміру кристалітів у різних напрямках. Зокрема у площині xu значення мікродеформації кристалічної ґратки γ' -фази (Ni_3Al) дорівнює 3,41 %, що більше ніж втричі перевищує цю величину для площини uz (0,10 %), а значення ОКР, навпаки, є вдвічі меншим. Така різниця може бути пов'язана з багаторазовим локальним нагрівом та швидким охолодженням, які провокують нерівномірне зростання або часткову дестабілізацію цих фаз [36]. Кількість карбідної фази NbC у площині xu є меншою (1 % проти 4 % для uz), проте із дещо вищим значенням мікродеформації, що може бути пов'язано з дифузійними процесами та механічною взаємодією з ГЦК-матрицею [32].

Достатньо інформативним є аналіз переважної кристалографічної орієнтації. За літературними даними для полікристалічної ГЦК-ґратки Ni співвідношення інтенсивностей дифракційних максимумів (200) та (111) становить 0,476 [37]. Для сплаву Inconel 718 після 3D-друку для площини uz це співвідношення становить $I_{200}/I_{111} = 0,83$, а для площини xu – $I_{200}/I_{111} = 2,91$, що свідчить про переважну кристалографічну орієнтацію в одному з напрямків і суттєву мікроструктурну анізотропію, наслідком якої є виявлена анізотропія мікротвердості.

Для більш детального дослідження кристалографічної текстури (111) також побудовані полюсні фігури (рис. 5). Для площини uz (рис. 5, а) спостерігається яскраво виражений максимум інтенсивності, що свідчить про наявність переважної орієнтації (111) у напрямку, перпендикулярному до площини нанесення шарів. Така особливість мікроструктури є типовою для SLM, оскільки тепловий градієнт сприяє направленому росту зерен і формуванню тексту-

Таблиця 1. Кількісний фазовий склад сплаву Inconel 718, мікрдеформація кристалічної ґратки ϵ та розмір ОКР

Площина	Фаза	Просторова група	ϵ , %	ОКР, нм	Кількісний фазовий склад, %
yz	γ (Ni)	225:Fm-3m	0,20	42	86
	γ' (Ni ₃ Al)	221:Pm-3m	0,10	26	3
	γ'' (Ni ₃ Nb)	59:Pmmn	2,05	22	7
	NbC	225:Fm-3m	1,12	14	4
xy	γ (Ni)	225:Fm-3m	0,28	54	92
	γ' (Ni ₃ Al)	221:Pm-3m	3,41	13	3
	γ'' (Ni ₃ Nb)	59:Pmmn	1,04	24	4
	NbC	225:Fm-3m	1,82	18	1

ри [37–38]. Натомість у площині xy (рис. 5, б) інтенсивність дифракції розподілена менш локалізовано, що вказує на відсутність домінуючої орієнтації (111).

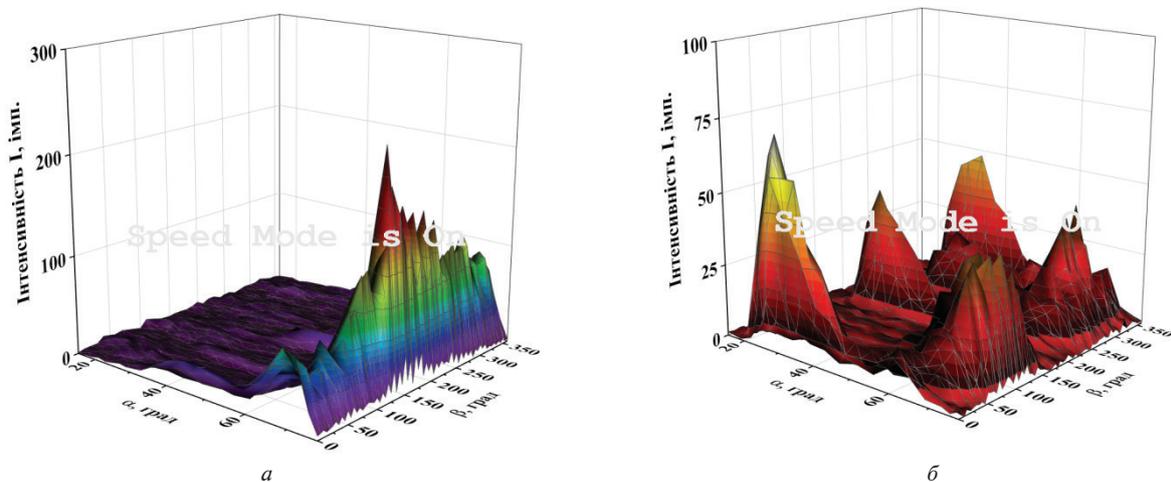
Такий характер розподілу свідчить про відносно випадкову орієнтацію зерен у площині, паралельній до шарів нарощування [39].

Спостерігається також суттєва анізотропія залишкових напружень між площинами (220) та (311) залежно від орієнтації зразка. Для напрямку yz залишкові напруження у площині (220) становлять -160 МПа, а у площині (311) зменшуються до -124 МПа. Для напрямку xy ці значення складають відповідно $+20$ МПа і -60 МПа. Така відмінність пояснюється як текстурною анізотропією, так і еластичною анізотропією кристалічної ґратки γ -фази з ГЦК-структурою. Площини (220) і (311) мають різну просторову орієнтацію, а кут між нормальми до цих площин становить приблизно 31° . Відомо, що еластичні властивості кристалів є анізотропними: напря-

мок [100] у ГЦК-ґратці є жорсткішим за напрямки [111] [38].

Площина (220) є ближчою до напрямків типу [100], що зумовлює більшу жорсткість і, відповідно, вищий рівень залишкових напружень стиснення в напрямку поперек росту зерен.

Додатково у процесі SLM формується спрямований тепловий потік вздовж вертикальної осі z , що сприяє витягнутому росту стовпчастих зерен у напрямку кристалізації [40]. Така мікроструктура зумовлює переважну орієнтацію певних кристалографічних площин відносно осей зразка. Це підтверджується також полюсними фігурами (рис. 5), де проявляється яскраво виражена текстура (111) у площині yz . Напруження формуються головним чином унаслідок нерівномірного охолодження та усадки розплаву під час SLM, де кожен новий шар спричиняє повторне нагрівання вже затверділого матеріалу [41]. Таким чином, більші напруження стиснення у площині (220) у перерізі yz

Рис. 5. Полюсні фігури для площини (111): а – yz ; б – xy

пояснюються більшим модулем Юнга в цьому кристалографічному напрямку, його орієнтацією відносно теплового градієнта та характером кристалізації у процесі SLM. У площині xu (рис. 5, б) залишкові напруження значно менші або навіть змінюють знак, що вказує на нерівномірний розподіл напружень у площині, паралельній до нарощування шарів, і відсутність переважної орієнтації відповідних площин.

Висновки

Охарактеризовано анізотропію мікроструктури SLM-сплаву Inconel 718: на горизонтальній поверхні зразків спостерігаються доріжки розплаву напівциліндричної форми, що зумовлюється процесом сканування лазерного променя поверхню шару порошку, а у вертикальній площині – мережа басейнів розплаву за типом «риб'ячої луски» (fish-scale), як результат послідовного затвердіння басейнів розплаву.

Показано значну варіативність значень мікротвердості у різних площинах: у вертикальному перерізі мікротвердість є вищою, однак із більшим розкидом, ніж у горизонтальному напрямку, що пов'язано з особливостями тепловідведення та формування шарів у процесі друку.

За результатами рентгеноструктурного аналізу ідентифіковано основну γ -фазу та зміцнюючі

γ' - і γ'' -фази, а також зафіксовано наявність карбиду NbC. Загальна кількість зміцнювальних фаз більша у вертикальному перерізі, що добре узгоджується із вищими значеннями мікротвердості.

Виявлено анізотропію залишкових напружень та текстури, яка є прямим наслідком фізики процесу SLM, включно з напрямком теплового потоку, швидкістю охолодження, повторним нагрівом шарів та орієнтацією зерен, що утворюються.

Результати доводять необхідність контролю стратегії сканування, параметрів лазерного друку та шляху термічного циклування для регулювання мікроструктури і напруженого стану в адитивно виготовлених деталях зі сплаву Inconel 718, що є критично важливим для покращення їхньої експлуатаційної надійності.

Надалі плануються дослідження впливу різних режимів термічної обробки на формування структурно-фазового стану SLM-сплаву Inconel 718.

Подяка

Роботу виконано в межах держбюджетної теми № 2701ф КПІ ім. Ігоря Сікорського. Номер державної реєстрації 0124U001001.

References

- [1] L.E. Murr *et al.*, “Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science”, *J. Mater. Res. Technol.*, 2012, vol. 1, no 1, pp. 42–54. [https://doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70009-1](https://doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70009-1)
- [2] M. O. Vasylyev *et al.*, “Wire-Feeding Based Additive Manufacturing of the Ti–6Al–4V Alloy. Part I. Microstructure”, *Progress in Physics of Metals*, 2023, vol. 24, no. 1, pp. 5–37. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.01.005>
- [3] Y.W. D. Tay *et al.*, “3D printing trends in building and construction industry: a review”, *Virtual Phys. Prototyping*, 2017, vol. 12, is. 3, pp. 261–276. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>
- [4] M. O. Vasylyev *et al.*, “Microstructure of Co–Cr Dental Alloys Manufactured by Casting and 3D Selective Laser Melting”, *Progress in Physics of Metals*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. 337–359. <https://doi.org/10.15407/ufm.23.03.001>
- [5] J.F. Barker, “The Initial Years of Alloy 718—A GE Perspective. Superalloy 718: A GE Perspective”, *Metall. Appl.*, 1989, pp. 269–277. DOI: 10.7449/1989/Superalloys_1989_269_277
- [6] D.F. Paulonis and J.J. Schirra, “Alloy 718 at Pratt & Whitney—Historical Perspective and Future Challenges”, *Superalloys*, 2001, no. 718, pp. 13–23. DOI: 10.7449/2001/Superalloys_2001_13_23
- [7] S. Sanchez *et al.*, “Powder Bed Fusion of nickel-based superalloys: A review”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2021, vol. 165, 103729 p. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2021.103729
- [8] С.В. Аджамський *та ін.*, “Аналіз структури після термічної обробки зразків з жароміцного ступу Inconel 718, виготовлених за SLM-технологією”, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 2021, vol. 43, no.7, pp. 909–924. <https://doi.org/10.15407/mfint.43.07.0909>
- [9] С.В. Аджамський *та ін.*, “Вплив параметрів SLM-процесу на формування області кордонів деталей з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718”, *Космічна наука і технологія*, 2021, Т. 27, № 6, С. 105–114. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>
- [10] R. Jiang *et al.*, “Effect of heat treatment on microstructural evolution and hardness homogeneity in laser powder bed fusion of alloy 718”, *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 35, 101282 p. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101282>

- [11] J. F. Radavich, "The physical metallurgy of cast and wrought alloy 718", 1989, Metallurgy and Applications, TMS, Warrendale, pp. 229–240.
- [12] X. Zhao *et al.*, "Study on microstructure and mechanical properties of laser rapid forming Inconel 718", Mater. Sci. Eng. A, 2008, vol. 478, is. 1–2, pp. 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.079>
- [13] Y. Wang *et al.*, "Microstructure evolution during dynamic recrystallization of hot deformed superalloy 718", Mater. Sci. Eng. A, 2008, vol. 486, is. 1–2, pp. 321–332 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.09.008>
- [14] Y. Wang *et al.*, "Hot deformation behavior of delta-processed superalloy 718", Mater. Sci. Eng. A, 2011, vol. 528, is. 7–8, pp. 3218–3227. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.013>
- [15] R.G. Thompson *et al.*, "The relationship between carbon content, microstructure, and intergranular liquation cracking in cast nickel alloy 718", Metall. Trans. A, 1991, vol. 22, pp. 557–567. <https://doi.org/10.1007/BF02656823>
- [16] G.A. Rao *et al.*, "Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed superalloy Inconel 718", Mater. Sci. Eng. A, 2003, vol. 355, is. 1–2, pp. 114–125. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00079-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00079-0)
- [17] C.H. Radhakrishna and K. Prasad Rao, "The formation and control of Laves phase in superalloy 718 welds", J. Mater. Sci., 1997, vol. 32, pp. 1977–1984. doi:10.1023/A:1018541915113
- [18] J.K. Hong *et al.*, "Microstructures and mechanical properties of Inconel 718 welds by CO₂ laser welding", J. Mater. Process. Technol., 2008, vol. 201, is. 1–3, pp. 515–520. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.224>
- [19] M.O. Vasylyev *et al.*, "Surface Post-Processing of Inconel 718 Alloy Fabricated by Additive Manufacturing: Selective Laser Melting", Prog. Phys. Met., 2024, vol. 25, no. 3. pp. 614–642. <https://doi.org/10.15407/ufm.25.03.614>.
- [20] J. Schröder *et al.*, "Understanding the impact of texture on the micromechanical anisotropy of laser powder bed fused Inconel 718", J. Mater. Sci., 2022, vol. 57, pp. 15036–15058. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07499-9>
- [21] U.G. Başçı *et al.*, "Microstructural, Mechanical, and Tribological Properties of Selective Laser Melted Inconel 718 Alloy: The Influences of Heat Treatment", Crystals, 2025, vol. 15, is. 1, 18 p. <https://doi.org/10.3390/cryst15010018>
- [22] С.М. Волошко *та ін.*, "Модифікування поверхні 3D-друкованого стопу Ti–6Al–4V ультразвуковим ударним обробленням", Металофіз. новітні технол., 2023, vol. 45, no. 2, pp. 217–237. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.02.0217>
- [23] Компанія ТОВ "Аддитивні лазерні технології України". [Online]. Доступно: https://alt-print.com/docs/In718_ds_uk.pdf.
- [24] D.A. Lesyk *et al.*, "Post-processing of the Inconel 718 alloy parts fabricated by selective laser melting: Effects of mechanical surface treatments on surface topography, porosity, hardness and residual stress", Surf. Coat. Technol., 2020, vol. 381, 125136 p. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125136>
- [25] V.G. Efremenko *et al.*, "Laser beam surface modification of additively manufactured Ni-based superalloy: Correlations of microstructure and tribological/corrosion properties", J. Mater. Res. Technol., 2025, vol. 35, pp. 4390–4411. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.02.063>
- [26] H. Yang *et al.*, "The printability, microstructure, crystallographic features and microhardness of selective laser melted Inconel 718 thin wall", Mater. Des., 2018, vol. 156, pp. 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.007>
- [27] R. Seede *et al.*, "Microstructural and Microhardness Evolution from Homogenization and Hot Isostatic Pressing on Selective Laser Melted Inconel 718: Structure, Texture, and Phases", J. Manuf. Mater. Process., 2018, vol. 2, is. 2, 30 p. <https://doi.org/10.3390/jmmp2020030>
- [28] E. L. Stevens *et al.*, "Variation of hardness, microstructure, and Laves phase distribution in direct laser deposited alloy 718 cuboids", Mater. Des., 2017, vol. 119, pp. 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.031>.
- [29] W. Shifeng *et al.*, "Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts", J. Mater. Process. Technol., 2014, vol. 214, is. 11, pp. 2660–2667. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.002>
- [30] N. Zotov *et al.*, "Change of transformation mechanism during pseudoelastic cycling of NiTi shape memory alloys", Mater. Sci. Eng. A., 2017, vol. 682, pp. 178–191. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.11.052>
- [31] H. Gong *et al.*, "Analysis of defect generation in Ti–6Al–4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes", Additive Manufacturing, vol. 1–4, pp. 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.002>
- [32] J.A. Lami *et al.*, "Dislocation distribution, crystallographic texture evolution and microstructural anisotropy of Inconel 718 processed by LPBF", Adv. Eng. Mater., 2023, vol. 5, 100157 p. DOI:10.48550/arXiv.2303.10522
- [33] Y. Liang *et al.*, "Selective anisotropy of mechanical properties in Inconel 718 alloy produced by plastic working", Materials, 2021, vol. 14, is. 14, 3869 p. <https://doi.org/10.3390/ma14143869>
- [34] A. Hamada *et al.*, "Strengthening and embrittlement mechanisms in laser-welded additively manufactured Inconel 718 superalloy", Welding in the World, 2024, vol. 69, pp. 81–98. <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01897-0>
- [35] J.-P. Choi *et al.*, "Densification and microstructural investigation of Inconel 718 parts fabricated by selective laser melting", Powder Technol., 2017, vol. 310, pp. 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.030>
- [36] D. Zhang *et al.*, "Numerical simulation in the absorption behavior of Ti6Al4V powder materials to laser energy during SLM", J. Mater. Process. Technol., 2019, vol. 268, pp. 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.002>

- [37] L. Velterop *et al.*, “X-ray Diffraction Analysis of Stacking and Twin Faults in f.c.c. Metals: A Revision and Allowance for Texture and Non-uniform Fault Probabilities”, *J. Appl. Crystallogr.*, 2000, vol. 33, no. 2, pp. 296–306. DOI: 10.1107/S0021889800000133
- [38] F. Otto *et al.*, “Decomposition of the single-phase high-entropy alloy CrMnFeCoNi after prolonged anneals at intermediate temperatures”, *Acta Mater.*, 2016, vol. 112, pp. 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.04.005>
- [39] R. Li *et al.*, “Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process”, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 2011, vol. 59, pp. 1025–1035. [30] <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3566-1>
- [40] E. Cetkin *et al.*, “Microstructure and mechanical properties of AA7075/AA5182 joined by FSW”, *J. Mater. Process. Technol.*, 2019, vol. 268, pp. 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.005>
- [41] P. Mercelis and J.-P. Kruth, “Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting”, *Rapid Prototyp. J.*, 2006, vol. 12, is. 5, pp. 254–265. <https://doi.org/10.1108/13552540610707013>

S.M. Voloshko, A.P. Burmak, M.M. Voron, N.V. Franchik, Ya.H. Furmaniuk

ANISOTROPY OF MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF SLM ALLOY INCONEL 718

Background. The use of additive technologies, in particular selective laser melting (SLM), opens up new opportunities for the manufacture of parts with complex geometric shapes. However, the specifics of the 3D printing process lead to several technological challenges. Research into the mechanisms of microstructural evolution during SLM is necessary to optimise technological modes and ensure reliable and long-term operation of printed products in various industries.

Objective. The paper aims to determine microstructure features and microhardness distribution in different planes of the Inconel 718 SLM alloy, as well as a comparative analysis of phase composition, texture, and macroscopic stress level.

Methods. A complex of techniques was applied - metallography, scanning electron microscopy, microdurometric and X-ray phase analysis.

Results. The anisotropy of the microstructure of the SLM alloy Inconel 718, which is formed during 3D printing as a result of sequential solidification of melt pools, has been identified and characterised. Significant variability of microhardness values in different planes has been shown as a consequence of the anisotropy of the structure and phase composition.

Conclusions. The amount of the main γ -phase and the strengthening γ' - and γ'' -phases, as well as NbC carbide, is determined. Factors affecting the anisotropy of residual stresses and texture are discussed, including the direction of heat flow, cooling rate, reheating of layers, and the orientation of the grains formed.

Keywords. Inconel 718; selective laser melting; microstructure; microhardness; phase composition; texture; stress.

Рекомендована Радою
навчально-наукового інституту матеріалознавства
та зварювання ім. Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
19 червня 2025 року

Прийнята до публікації
08 вересня 2025 року

DOI: 10.20535/kpispn.2025.3.337306

УДК 004.942:681.5

О.М. Пупена^{1*}, О.М. Клименко², В.В. Полупан²¹ КПП ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна² Національний університет харчових технологій, Київ, Україна,

*corresponding author: pupena_san@ukr.net

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ КЛЮЧОВИХ СТАНДАРТІВ ДЛЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ У ПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Проблематика. Для розвитку і масштабування цифрових двійників (ЦД) потрібні уніфіковані інструменти, підходи і передусім понятійний апарат. Розроблені нині стандарти з цієї тематики є достатньо новими, тому їх зміст не завжди легко зрозуміти.

Мета дослідження. Метою роботи є отримання відповідей на питання щодо того, які стандарти безпосередньо стосуються ЦД у галузі виробництва, їх призначення, змісту і застосування і можливості їх сумісного використання.

Методика реалізації. Для досягнення поставленої мети було проаналізовано публічно доступні наукові статті, що репрезентують позиції різних наукових шкіл. Основну увагу було приділено роботам, у яких висвітлювалися питання уніфікації та стандартизації ЦД. Проведено огляд і систематизацію основних положень щодо існуючих стандартів, виконано класифікацію ключових термінів і структурних елементів, а також визначено сферу застосування кожного зі стандартів у контексті промислових ЦД.

Результати дослідження. У процесі дослідження було здійснено комплексний аналіз ключових міжнародних стандартів, присвячених ЦД, зокрема ISO/IEC 30173:2023, ISO 23247:2021 (усі чотири частини), IEC 63278-1:2023, ISO/IEC TR 30172:2023 та ISO/TR 24464:2025. Зроблено порівняння основної термінології стосовно ЦД, цільової сутності та їх зв'язку; структурних представлень ЦД; концепцій життєвих циклів ЦД; галузь використання ЦД; зв'язок з іншими стандартами та можливість сумісного застосування.

Висновки. Хоча формально між стандартами ISO/IEC 30173, ISO 23247 та IEC 63278 немає явних суперечностей, проведений аналіз їхніх підходів до побудови каркасів ЦД виявив принципові відмінності в понятійному апараті, структурі ЦД, вказаних у базових стандартах, на які вони посилаються. Це дозволяє зробити висновок, що їхнє одночасне використання в межах єдиного життєвого циклу ЦД неможливе без впровадження додаткового адаптаційного шару, який забезпечував би їхню сумісність.

Ключові слова: цифровий двійник; цільова сутність; стандарти цифрових двійників; життєвий цикл; IoT.

Вступ

Відтоді, як ЦД вперше запропонував на початку 2000-х років Майкл Грівз [1] під час презентації курсу з управління життєвим циклом продукції, вже пройшло більше двадцяти років, однак тільки останнім часом ця тема стала однією з найбільш динамічних у промисловому секторі. На початку другого десятиріччя XXI століття, реалізація ЦД вважалась складною процедурою, що вимагала значного розвитку різних технологій та значних ресурсів. Перші впровад-

ження зробили NASA для моделювання умов у космосі та проведення випробувань для підготовки польотів, пізніше вона почала поширюватися на обслуговування літаків і на виробничу сферу. З розвитком технологій, що стали основою Індустрії 4.0, зокрема промислового Інтернету речей, машинного навчання, штучного інтелекту та хмарних обчислень, концепція отримала весь необхідний стек для реалізації.

Водночас, як і будь-яка технологія, що динамічно розвивається, ЦД часто використовують як чергову гарну назву, яка добре продаєть-

Пропозиція для цитування цієї статті: О.М. Пупена, О.М. Клименко, В.В. Полупан, «Систематизація ключових стандартів для цифрових двійників у промисловому виробництві», Наукові вісті КПП, № 3, с. 60–73, 2025. doi: <https://doi.org/10.20535/kpispn.2025.3.337306>

Offer a citation for this article: O.M. Pupena, O.M. Klymenko, V.V. Polupan, “Systematization of key standards for digital twins in industrial manufacturing”, KPI Science News, no. 3, pp. 60–73, 2025. <https://doi.org/10.20535/kpispn.2025.3.337306>

ся. І як з Індустрією 4.0/5.0, ажіотаж навколо ЦД створює додатковий бар'єр для його сприйняття технічними спеціалістами та бізнесом.

Нині ЦД називають моделі, 3D-візуалізацію, навіть системи диспетчеризації. Навіть серед спеціалістів, що вже мають досвід впровадження ЦД, часто немає єдиного бачення, що взагалі можна назвати цифровим двійником. Те саме стосується науковців, особливо з різних наукових шкіл та галузей/підгалузей знань. Це своєю чергою зумовлено тим, що як і моделювання, ЦД можуть віддзеркалювати будь-що, в чому є потреба, для зовсім різних цілей. Наприклад, так само як модель турбіни літака в динаміці відрізняється від 3D-моделі приміщення в статистиці, ЦД турбіни та будівлі будуть зовсім інші і використовуватимуться для зовсім різних задач. Водночас сама концепція залишається єдиною, а отже найбільш загальні кращі практики можна переносити і масштабувати. Для розвитку і масштабування потрібні уніфіковані інструменти, підходи і передусім понятійний апарат. Для цього у світі використовуються стандарти, які закріплюють кращі практики і дають можливість діяти злагоджено.

Таким чином, під час використання конкретних практик, а тим більше стандартів, питання означення ЦД та інших його базових складових не потребуватиме трактувань. Наявність стандартизованих підходів у сфері ЦД забезпечить методологічну єдність у визначенні термінології, структурних компонентів та функціональних можливостей ЦД у міждисциплінарному середовищі. Впровадження стандартів сприяє досягненню сумісності між системами різних виробників, полегшує інтеграцію даних, моделей і сервісів, а також забезпечує інтероперабельність міжгалузевих рішень. Крім того, стандартизація створює передумови для підвищення довіри до ЦД через формалізацію вимог до їхньої достовірності, відтворюваності та відповідності фізичним об'єктам. Таким чином стандарти є інструментом, що підтримує масштабованість, повторне використання та розвиток екосистем ЦД у різних галузях промисловості. Тому, починаючи з 2018 року, міжнародні організації зі стандартизації, зокрема ISO, IEC, IEEE та ITU, ініціювали розроблення відповідних стандартів і технічних звітів, серед яких одними з перших стали серії ISO 23247, ISO/IEC 30173, IEC 62832 та інші. Ці документи формують основу для системного впровадження ЦД.

Як описано нижче, самі стандарти не гармонізовані, навіть у галузі єдиного сегменту,

наприклад виробництва. Поява кількох стандартів від різних комітетів вносить плутанину та незрозумілість щодо їх застосування. Самі стандарти потребують додаткового тлумачення та путівника щодо їх використання.

Постановка задачі

Це дослідження призначене для отримання відповідей на такі запитання:

– які стандарти безпосередньо стосуються ЦД в галузі виробництва?

– які призначення, зміст і застосування розглянутих стандартів?

– які найбільш загальні і спільні концепції використовуються для всіх стандартів і їх сумісне використання?

Методи дослідження

1. Огляд літератури

Нині ЦД є однією з головних тем для дослідників, що свідчить про безсумнівну потребу ринку в їх запровадженні. Велику кількість статей можна знайти у відкритому доступі. Однак наше дослідження стосується саме стандартів для ЦД, тому розглянемо лише ті статті, в яких було описано тему уніфікації та стандартизації, які наразі є у публічному доступі та які подані різними науковими школами, зокрема США [2], [3], Китаю [4], Італії [5], Південної Кореї [6] та Великобританії [7].

Основну увагу було приділено оглядам, які передували появі перших стандартів. Фундаментальною оглядовою статтею в темі є робота [5], в якій автори аналізували визначення ЦД, які мають бути його основні характеристики і галузі застосування. Вони класифікували концепцію та означення за більш ніж сімдесятьма джерелами, за галуззю застосування (найбільше – виробництво), за роком публікацій, а також визначили основні характеристики ЦД, які наведено в наукових джерелах. Крім цього, автори проаналізували зафіксовані випадки застосування у трьох основних галузях – виробництво, авіація та охорона здоров'я. Окремо було наголошено на цінності використання ЦД для колаборативного проектування, коли у процесі створення продукту залучено кілька предметних експертів, що потребує стандартизації та уніфікації. Розглянули можливості та проблеми використання ЦД у контексті життєвих циклів.

У 2021 році після публікації ISO 23247, з'явилися статті, які ґрунтуються на цій серії стандартів. Однак низка авторів відмічають розбіжності між наявними стандартами та роботою різних комітетів. Так у статті [4] розглянуто проблему відсутності єдиної термінології та стандартизованих підходів до ЦД, що ускладнює їхню взаємодію між різними підприємствами й галузями. Автори обґрунтовують необхідність стандартизації як ключового чинника, для ефективного впровадження цієї міждисциплінарної технології. Для цього було проведено дослідження щодо наявних стандартів і каркасів, які стосуються впровадження ЦД, зокрема в таких ключових аспектах, як технічна архітектура, приклади застосування та виклики. Як відправну точку вони використали п'ятивимірну архітектуру, запропоновану в роботі своїх колег: фізичну сутність, віртуальну сутність, дані ЦД, з'єднання та сервіси. Для кожного з вимірів автори виділили конкретні потреби в майбутній стандартизації, а також зробили мапу стандартів, яку назвали каркасом (framework) стандартів для ЦД. Водночас автори зауважили, що є проблема з узгодженістю наявних стандартів для самого означення ЦД, зокрема самого терміну «цифровий двійник».

Враховуючи різні органи стандартизації, такі як ISO, IEC, ITU-T, IEEE-SA, що часто зосереджуються на певних галузях застосування ЦД, відрізняється не тільки концепція, а й означення самого ЦД, що є викликом для сумісності та інтероперабельності. Тому автори зазначають важливість, майбутнього на той час, спільного стандарту ISO/IEC 30173 [8] як єдиного фундаментального. Водночас автори зазначають позитивною рисою те, що стандарти випереджають масове впровадження ЦД, що може прискорити їх розвиток. Фактично багато стандартів вже є, їх необхідно узгоджувати в межах використання ЦД.

У [7] дослідники також зауважують, що стандарти тільки з'являються і дуже залежать від сфери застосування ЦД. Вони також систематизували поняття ЦД, означення ЦД та їх структури, порівняли ЦД з іншими технологіями та концепціями. З огляду на те, що ЦД використовується в багатьох сферах і залежить від інших еволюційних технологій, на його реалізацію дуже впливають поточний стан цих технологій і потреба адаптації до кожної конкретної задачі та предметної області.

Відсутність усталених єдиних стандартів стримує широке впровадження, масштабування і повномасштабну реалізацію цієї технології. Ав-

тори зробили зріз наявних стандартів для ЦД. Серед основних викликів впровадження автори виділяють синхронізацію з високою точністю, сумісність з наявним програмним забезпеченням, яке використовується у виробничому циклі, питання кібербезпеки, безпеки IoT та безпеки міжгалузевої взаємодії, додаткові витрати на ресурси, час і дослідження ЦД.

У статті [3] автори проаналізували серію стандартів ISO 23247 та оцінили можливість їх застосування у нових галузях промисловості та новітніх виробничих технологіях на прикладі адитивного виробництва. Ця оглядова стаття містить досить детальний опис чотирьох наявних частин серії та майбутніх частин.

У статті [2] автори також зазначають, що у зв'язку з індивідуальними підходами до створюваних нині ЦД, є гостра потреба в стандартизації, зокрема інтероперабельності для можливості інтеграції зі старими системами та ЦД між собою, онтологій каркасу ЦД, а також для тестування ЦД. Автори зауважують, що наявність кількох каркасів, зокрема стандартизованих, які відрізняються як загальною структурою, так і кількістю компонентів, ускладнює процеси вибору та наступної інтеграції рішень. Крім того, екосистема ЦД наразі не сформована, а більшість рішень є індивідуальними, що унеможлиблює повторне використання і є дорогим та тривалим процесом. Задачу здебільшого вирішують локально, а не комплексно, самі ж ЦД використовують тільки на певних етапах життєвого циклу. Останнє ускладнює передачу даних по життєвому циклу двійника, що заважає створенню «цифрової нитки», а отже усіх переваг від впровадження ЦД.

У своєму дослідженні автори виділили основні класи ЦД (описові, діагностичні, прогностичні, приписувальні та інтелектуальні), що фактично відповідає типам аналітичних сервісів. У роботі наведено основні рамкові стандарти щодо ЦД, а також додаткові, які можуть використовуватися для конкретних аспектів ЦД. У статті на конкретному прикладі показано процес розроблення ЦД з використанням стандартів на основі каркасу ISO 23247, а також майбутні напрями досліджень для стандартизації – цифрова нитка, композиція ЦД, онтології для каркасу ЦД, створення ЦД з повторно використовуваних компонентів, оцінювання достовірності ЦД, ЦД та метавесвіт (VR, AR, MR).

Хоч у дослідженні [6] автори здебільшого зосереджувалися на інтеграції ШІ з ЦД, вони

окремо розглянули фундаментальні основи ЦД та стандарти, що дає змогу краще їх зрозуміти. Вони зібрали сімдесят означень ЦД з різних джерел, виділили сім різних архітектур, категорій ЦД. Класифікація понять ЦД проводилася з погляду застосування, ієрархії та моделювання. Як і їх колеги, автори наголошують на важливості стандартів.

Отже, можна сказати, що наукова спільнота визнає критичну важливість стандартизації як ключового чинника для реалізації повноцінних екосистем ЦД і переходу від локальних рішень до системного міждисциплінарного впровадження.

2. Актуальність проблеми

У деяких з наведених статей вдало описано серію стандартів ISO 23247, що значно спрощує його імплементацію. Однак нам поки що не траплялися статті з оцінкою стандарту ISO/IEC 30173, оскільки його було опубліковано у 2023 році. Додатково в роботах згадується використання Asset Administration Shell з концепції RAMI 4.0, однак з аналізу самого стандарту, застосованого для ЦД, статті не траплялися. Враховуючи зосередженість цього дослідження виключно на виробничій сфері, станом на момент написання статті, можна виділити такі стандарти, що стосуються рамкових концепцій ЦД:

- ISO 23247:2021 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing;
- ISO/IEC 30173:2023 – Digital twin – Concepts and terminology;
- IEC 63278-1:2023 – Asset Administration Shell for industrial applications – Part 1: Asset Administration Shell structure;
- IPC-2551, International Standard for Digital Twins.

Також ми ознайомилися з текстами усіх наведених стандартів, окрім IPC-2551. Окрім того, додатково було проаналізовано текст таких технічних звітів:

- ISO/IEC TR 30172:2023 – Internet of things (IoT) – Digital twin – Use cases;
- ISO TR 24464:2025 – Visualization elements of digital twin – Visualization fidelity.

Серед усіх наведених стандартів тільки над ISO 23247 було виконано досить ґрунтовну роботу. Водночас інші стандарти фактично не розглянуті. Крім того, нам не траплялися порівняння стандартів між собою та поради щодо їх

застосування. Тому дослідження питань їх змісту та порівняння є актуальними.

Таким чином актуальним залишається комплексний аналіз наведених вище ключових міжнародних стандартів, присвячених ЦД, щодо термінології, структури ЦД, життєвих циклів ЦД, і галузь використання цих стандартів та сумісного застосування під час розроблення систем з використанням ЦД.

У наступних частинах цієї статті здійснено систематизацію щодо цих стандартів, зокрема виділено та проведено порівняння основних термінів і конструкцій, а також визначено застосовність стандартів і можливість їх сумісного використання.

3. Зміст рамкових стандартів технічних звітів стосовно цифрових двійників для виробництва

ISO/IEC 30173:2023 Digital twin – Concepts and terminology [8]

Призначення стандарту ISO/IEC 30173 – встановити термінологію для ЦД (DTw) і описати концепції в цій області функціональне представлення та зацікавлені сторони ЦД. Це своєю чергою має стати основою для інших стандартів і зрозумілішої комунікації між різними зацікавленими сторонами. Також у стандарті наведено перелік переваг та вигод від впровадження ЦД. Варто зауважити, що хоч цей стандарт є найбільш фундаментальним, він був опублікований пізніше за ISO 23247, хоч той має більш прикладний характер.

У стандарті об'єкт, для якого створюється ЦД, означається як цільова сутність (target entity) – це щось існуюче і відокремлене, що виконує певну функцію в реальному світі та є об'єктом цифрового представлення. Цільова сутність може бути як фізичною (сутність у фізичному світі, яка може бути об'єктом вимірювання або впливу), так і цифровою (обчислювальна сутність, що складається з елементів даних і процедурних елементів). Цифровий двійник – це цифрове представлення цієї цільової сутності разом з каналами передачі даних, які забезпечують узгодження фізичного й цифрового станів із відповідною швидкістю синхронізації. Цифровий двійник може забезпечувати інтегроване уявлення протягом усього життєвого циклу цільової сутності.

Також у стандарті означене поняття системи ЦД – це гібридна сутність або система систем, що складається з цільових сутностей, цифрових сутностей, з'єднання даних між ними, а також моделей, даних та інтерфейсів, задіяних

у процесі передавання даних. Система ЦД містить щонайменше одну цільову сутність і її цифрову сутність, які синхронізуються і взаємодіють із зацікавленими сторонами для покращення одного або кількох показників ефективності цільової сутності на одному або кількох етапах її життєвого циклу. Цифрова сутність у цій системі – це поєднання обчислювальних або інформаційних компонентів, створених цифровими технологіями на основі характеристик цільової сутності. Цільова сутність має надавати дані моделювання й оперативні дані, в режимі наближеному до реального часу, цифровій сутності, яка, у свою чергу, повертає результати аналізу, що забезпечує таким чином взаємне підсилення.

Для більш фундаментального означення у стандарті для встановлення осмисленого зв'язку між фізичними явищами, їх цифровими представленнями та значеннями використовується принцип семіотики. Він дає змогу описати, як спостережувані дані (феномени) через певні символи (наприклад, сигнали, мітки, ідентифікатори) отримують інтерпретацію в цифровому середовищі, формуючи семантичні конструкції, придатні для аналізу та автоматизованого прийняття рішень. Це дозволяє ЦД ухвалювати рішення в реальному часі, навіть за умов часткової невизначеності, й адаптувати свою поведінку або вплив на фізичну систему відповідно до інтерпретованої ситуації.

Для розуміння місця ЦД серед інших споріднених концепцій у стандарті наведено порівняння ЦД з імітаційним моделюванням, кіберфізичними системами та Інтернетом речей. Це порівняння дозволяє окреслити відмінності та взаємозв'язки між цими підходами. Зокрема, на відміну від традиційного імітаційного моделювання, яке зазвичай працює поза реальним об'єктом, ЦД має постійний зв'язок із фізичною сутністю та функціонує в режимі двосторонньої синхронізації. У контексті кіберфізичних систем ЦД розглядається як модельна складова, яка забезпечує відображення стану об'єкта, тоді як кіберфізична система охоплює повну реалізацію взаємодії між фізичним і цифровим рівнями. Інтернет речей, у свою чергу, є базовою інфраструктурою для збору та передавання даних, необхідних для функціонування ЦД, забезпечуючи основу для їхньої інтерактивності та оперативності.

Цілий розділ присвячений контексту системи ЦД, в якому описано ключові компоненти, функції та взаємозв'язки, що забезпечують його роботу в межах ширшої інформаційної екосистеми. У цьому контексті ЦД розглядається

не ізольовано, а як гібридна система, що поєднує фізичну сутність (цільовий об'єкт або процес), цифрову сутність (модель або символічне представлення), засоби передачі даних між ними, а також інтерфейси і ресурси, які забезпечують їхню взаємодію.

Згідно зі стандартом ISO/IEC 30173, процес життєвого циклу ЦД описує етапи розвитку як самої цифрової сутності, так і пов'язаної з нею цільової сутності. Ці два життєві цикли мають подібну структуру, але не завжди збігаються за часовими віхами. На етапі спільного існування цифрова та цільова сутності перебувають у постійному зв'язку із заданою частотою синхронізації. Зміни, що виникають у цифровій сутності на етапах експлуатації, аналізу або повторного оцінювання, можуть бути ітеративно повернені до фази проєктування, що дозволяє вдосконалювати моделі або функціональні можливості. Такий підхід відображає гнучкість ЦД як інструмента для адаптивного управління системами протягом усього їх життєвого циклу.

Згідно зі стандартом виділяються різні типи ЦД залежно від охоплення цільової сутності: компонента, активу, системи або процесу. Цифровий двійник компонента – це зазвичай ключовий елемент, що суттєво впливає на ефективність цільової сутності, до якої він належить. Наприклад це може бути насос всередині системи, для якого треба окремо створити ЦД. Цифровий двійник активу, який може охоплювати кілька компонентів ЦД, забезпечує огляд на рівні одиниці устаткування. Цифровий двійник системи розробляється для сутностей, які спільно реалізують системну або мережну функцію, що дає змогу бачити взаємодію пов'язаних або взаємозалежних сутностей. Цифровий двійник процесу надає уявлення про сукупність дій або операцій, і може містити фізичні сутності або ЦД систем, але головну увагу зосереджено саме на процесі, а не на фізичних об'єктах. Таке розділення дозволяє створювати багаторівневі ЦД, адаптовані до конкретних потреб на різному рівні ієрархії керування.

У стандарті також означено ключові зацікавлені сторони системи ЦД, які беруть участь у її створенні, підтримці та використанні. Вони поділяються на дві основні категорії: учасники системи ЦД та партнери екосистеми. Такий поділ ролей дозволяє структурувати відповідальність і взаємодію у складних проєктах ЦД, сприяючи їх ефективному розвитку і впровадженню.

ISO 23247 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing

Досить детально усі частини серії ISO 23247 описані в [3]. Тут виділимо тільки найважливіше. Тоді як ISO/IEC 30173 є універсальним стандартом для означення концепції та термінології, серія міжнародних стандартів ISO 23247 становить фундаментальну основу (каркас) для розробки та впровадження ЦД саме у сфері виробництва. Ці документи стандартизують підхід до створення, інтеграції та керування ЦД спостережуваних виробничих елементів (observable manufacturing elements, OME) на виробництві.

Перша частина ISO 23247-1 [9] формує загальний каркас для створення ЦД у виробництві, означуючи базові терміни, концепції та ключові принципи, на яких ґрунтується подальша деталізація в наступних частинах серії. Документ наводить переваги та описує основні функції ЦД, серед яких віртуалізація спостережуваних виробничих елементів, забезпечення двостороннього зв'язку між фізичним і цифровим середовищем, а також підтримка прийняття рішень на основі даних. Цифрові двійники класифіковано за типами спостережуваних об'єктів – персонал, об-

ладнання, матеріали, процеси, інфраструктура, довкілля, продукція й супровідна документація. У додатку А ISO 23247-1 показано застосування ЦД протягом життєвого циклу продукції, зокрема розглянуто відношення між виробничими ЦД та системними ЦД, а також поняття керованого і керуючого двійника, відповідно до фактичного та планового подання виробничих процесів. Такий розподіл дозволяє інтегрувати ЦД виробництва у ширший контекст цифрової нитки (digital thread) і забезпечити повне відслідковування та зворотний зв'язок між стадіями розробки, виробництва та експлуатації.

Запропонований у стандарті каркас у свою чергу ґрунтується на каркасі Інтернету речей (IoT), затвердженого в стандарті ISO/IEC 30141. У другій частині [10] подано референтну архітектуру ЦД у контексті відображення на каркас IoT. У табл. 1 показано відображення у контексті моделі сутностей (Entity).

У третій частині стандарту [11] подано довідкову інформацію щодо того, які типи інформаційних атрибутів слід моделювати для забезпечення адекватної цифрової репрезентації елементів виробничого середовища. У цій ча-

Таблиця 1. Відображення сутностей ISO/IEC 30141 на ISO 23247

Сутність ISO 23247	Аналогічна сутність ISO/IEC 30141	Функціональне призначення
Observable Manufacturing Resources не є частиною каркасу, але об'єкт впливу	Physical Entity (PE) є частиною IoT системи	Фізичні ресурси (обладнання, персонал, середовище, матеріали), які є об'єктами моделювання і спостереження
Device Communication Entity: Data collection sub-entity; Device control sub-entity	IoT Device або/i IoT Gateway	Отримання даних з фізичних об'єктів (OME), керування виконавчими механізмами, передача інформації далі
Digital Twin Entity	—	Забезпечує моделювання, симуляцію (імітаційне моделювання), синхронізацію, аналітику ЦД
Digital Twin Entity: Operation and Management Sub-entity	Management Entity / Service Management	Керує життєвим циклом ЦД, забезпечує підтримку, синхронізацію, оновлення моделей
Digital Twin Entity: Application and Service Sub-entity	Application Entity / Analytics / Simulation	Виконує обробку даних, моделювання, аналітику, прогнозування та генерацію звітів
Digital Twin Entity: Resource Access & Interchange Sub-entity	Resource Access Entity / Interface Gateway	Підключення до інших систем (ERP, PLM), інтероперабельність, API, контроль доступу
User Entity	IoT-Users	ERP, MES, HMI-системи або люди, які взаємодіють із ЦД через інтерфейси
Cross-system Entity	Cross-cutting Functions / Interworking Functions	Забезпечує міждоменну підтримку: переклад форматів, гарантії даних, безпеку, сертифікацію

стині встановлено базову структуру для опису спостережуваних виробничих елементів, та вказано на відповідні наявні стандарти, які можуть використовуватися для подання цих даних. У додатку А ISO 23247-3 наведено перелік таких стандартів, з коротким описом їх функціональності, а додаток В містить практичні приклади у вигляді XML-фрагментів для кожного типу ОМЕ, забезпечуючи орієнтацію розробникам під час реалізації ЦД.

Четверта частина [12] присвячена питанням інформаційного обміну між різними сутностями в межах архітектури ЦД. Тут означено технічні вимоги до мережної взаємодії та протоколів передачі даних, необхідних для підтримки синхронізації між фізичним середовищем, ЦД та користувацькими системами. Приклади організації зв'язку на різних рівнях показано в додатку А цієї частини, а у додатках В–Е – сценарії застосування. Ці сценарії охоплюють приклади застосування ЦД у дискретному виробництві. Формат опису сценарію дозволяє стандартизовано документувати сценарії використання ЦД у виробництві й полегшує їх впровадження у різних індустріях.

Майбутні частини стандарту описані в [2]. Мета стандарту ISO 23247-5 – це описати, як цифрова нитка (digital thread) забезпечує створення, зв'язок, керування і підтримку ЦД протягом усього життєвого циклу продукту. Стандарт ISO 23247-6 присвячений композитним ЦД.

IEC 63278-1 Asset Administration Shell for industrial applications – Part 1: Asset Administration Shell structure

Стандарт IEC 63278-1 «Оболонка адміністрування активів для промислових застосувань» [13] хоч і не характеризується як стандарт для ЦД, однак його структура, концепції та функціональні можливості безпосередньо відповідають вимогам, що висуваються до цифрових представлень активів у сучасних виробничих системах. Оболонка адміністрування активу (Asset Administration Shell, AAS) забезпечує уніфіковану модель опису фізичних і логічних активів, підтримує життєвий цикл активу, дозволяє взаємодію з різними зацікавленими сторонами, і завдяки цьому може розглядатися як фундаментальна технологія для реалізації ЦД у промисловому середовищі. Зокрема у додатках наведено приклад, який визнає оболонку управління активом (AAS) як одну з міжоперабельних реалізацій ЦД у контексті виробництва. Тому цей стандарт є цікавим з погляду можливої парадигми імплементації, сумісної з концепцією RAMI 4.0, поряд

зі стандартами ISO 23247, адже оболонка керування активом може розглядатися як основа для побудови ЦД у виробничих системах. Її структура, модульність і здатність до взаємодії з іншими компонентами через стандартизовані інтерфейси робить її придатною для реалізації міжоперабельних цифрових представлень фізичних активів, як це й передбачає модель RAMI 4.0.

Ключовими цілями оболонки адміністрування активів є:

- забезпечення інтероперабельності між системами і застосунками за допомогою уніфікованої структури даних; під інтероперабельністю розуміється здатність різних систем, компонентів або організацій ефективно обмінюватися, інтерпретувати й використовувати інформацію, навіть якщо вони походять від різних виробників або реалізовані на різних платформах;
- відокремлення даних від фізичного активу для підтримки цифрової трансформації та концепцій, наприклад ЦД;
- підтримка життєвого циклу активу, зокрема у проектуванні, виробництві, експлуатації, техобслуговуванні й утилізації;
- створення модульної, розширюваної і динамічної структури цифрових описів, здатної до адаптації у складних виробничих середовищах;
- забезпечення захищеного і контрольованого доступу до інформації та сервісів активу за допомогою стандартизованих інтерфейсів (AAS interface).

Оболонка AAS містить інформацію керування оболонкою (ідентифікаційні атрибути, версійна інформація) та опис активу. AAS може репрезентувати як тип активу, так і окремий його екземпляр, що дозволяє точно прив'язати AAS до реального або логічного об'єкта у виробничій системі.

У середині AAS має підмоделі, які описують певний аспект активу, наприклад основні характеристики і конфігурації або експлуатаційні дані чи документацію. Підмоделі організовані у деревоподібній структурі, що складаються з елементів підмоделі (SubmodelElements), які містять окремі одиниці інформації, та реалізують різні функції. Це можуть бути властивості з конкретними значеннями, або посилання на інші сутності або сервіси. Наприклад, елементом може бути опис напруги живлення, файл з технічною документацією, або відношення до інших активів, наприклад типу «складається з». Деякі елементи дозволяють звертатися до сервісів, пов'язаних з активом, або реалізованих самим активом через вбудовані інтерфейси.

Ще одним важливим компонентом є програмний інтерфейс AAS, за допомогою якого зовнішні програмні застосунки (так звані AAS user applications) можуть отримувати доступ до даних, модифікувати їх або виконувати сервіси. Цей інтерфейс дозволяє реалізувати доступ до AAS як у вигляді REST API, так і через промислові протоколи, зокрема OPC UA.

AAS також містить поняття сервісів активу (функціональності), які реалізуються самим активом і можуть бути викликані через AAS, або які логічно пов'язані з активом, але не реалізуються ним безпосередньо.

Важливим аспектом є вбудовані засоби безпеки та контролю доступу, які ґрунтуються на положеннях IEC 62443, що дозволяє AAS бути придатною для промислового використання в умовах високих вимог до інформаційної безпеки.

У стандарті передбачено можливість асоціювання кількох AAS з одним і тим самим активом. Це пов'язано з кількома стейкхолдерами, які мають свої потреби у цифровому представленні того самого активу, що дозволяє гнучко реалізовувати вимоги щодо функцій, інформаційної безпеки, конфіденційності, ролей доступу та локальних стратегій керування даними. Кожна AAS має свого відповідального (AAS responsible), власну структуру підмоделей та інтерфейс, і може розвиватися незалежно від інших оболонок того самого активу. У стандарті також зазначено, що хоча ці оболонки незалежні, за певних умов може відбуватись синхронізація між ними – наприклад, під час передачі інформації між виробником і користувачем, або під час оновлення даних, пов'язаних з технічним обслуговуванням чи модернізацією.

У стандарті IEC 63278-1 акцентується увага на незалежності життєвих циклів активів і оболонок адміністрування цих активів (AAS). Актив – як фізичний, так і логічний – має власну динаміку змін: його характеристики можуть змінюватись у результаті зносу, модернізації, переналаштування або зовнішніх чинників. Оболонка, яка подає цей актив у цифровій формі, також проходить свій життєвий цикл, зокрема через оновлення структурних підмоделей, зміни значень параметрів або розширення інформації. Ця незалежність означає, що зміни активу не обов'язково автоматично відображаються в його цифровому представленні. І навпаки, оновлення оболонки не гарантує, що сам актив фізично змінився. Внаслідок цього стандарт наголошує на необхідності синхронізації даних

між активом та його оболонкою. Своєчасна та точна синхронізація забезпечує достовірність цифрового опису, що критично важливо для автоматизованого керування, діагностики, планування технічного обслуговування і реалізації концепцій ЦД.

У стандарті IEC 63278-1 наведено приклад загального сценарію використання AAS, який інтегрує кілька перспектив: життєвого циклу активів, обміну цінністю між сторонами та структури самих оболонок. Цей сценарій демонструє розподілену модель ведення AAS, де кожна сторона веде свою оболонку з власним набором атрибутів і політиками доступу, при цьому зберігається узгодження через унікальні ідентифікатори та означені інтерфейси.

Додаток А цього стандарту містить огляд релевантних стандартів і джерел, які можуть використовуватись для побудови шаблонів підмоделей (Submodels) оболонки адміністрування активів. Додаток В демонструє «використовувану перспективу» (usage view) оболонки адміністрування активів, тобто описує, як різні ролі взаємодіють з AAS як системою. Додаток С присвячений темі інформаційної безпеки для промислових систем автоматизації та керування (IACS) і ґрунтується на серії стандартів IEC 62443.

ISO/IEC TR 30172 Internet of things (IoT) – Digital twin – Use cases

ISO/IEC TR 30172:2023 «Internet of Things (IoT) – Digital Twin – Use Cases» [14] є технічним звітом, який присвячений збиранню, систематизації та поданню прикладів використання ЦД (DTw) у різних галузях. Його основна мета – подати репрезентативні сценарії застосування DTw, які можуть бути використані як база для подальших робіт зі стандартизації, порівняльного аналізу, а також для визначення нових технічних вимог ринку.

Документ містить короткі, але структуровані описи дванадцяти сценаріїв використання, зібраних у вигляді шаблонів, що охоплюють ключові елементи: назву сценарію, галузь застосування, статус життєвого циклу, цифрову інфраструктуру, задіяні сутності та акторів, цілі, KPI та інші релевантні характеристики.

Окрім місця в документі займає Додаток А, який містить уніфікований шаблон опису сценарію використання. Він дозволяє систематизувати подану інформацію, враховуючи як технічні, так і організаційні аспекти впровадження ЦД.

У звіті також висвітлено набір ключових показників ефективності для рішень, що ґрунтуються на ЦД.

Загалом ISO/IEC TR 30172:2023 є платформою для обміну практичним досвідом і сприяє гармонізації підходів до побудови ЦД у контексті Інтернету речей.

ISO/TR 24464:2025 Visualization elements of digital twin – Visualization fidelity

ISO/TR 24464:2025 «Елементи візуалізації цифрового двійника – Точність візуалізації» [15] є технічним звітом, який присвячений аналізу візуалізаційної достовірності (fidelity) у ЦД, з акцентом на промислові застосування. Документ пропонує концептуальну трьохелементну архітектуру системи промислового ЦД (iDTw system), що складається з фізичного об'єкта (PTw), його цифрового представлення (iDTw) та інтерфейсу спарювання, який забезпечує обмін даними і синхронізацію між ними. Такий підхід дає змогу формалізувати структуру ЦД та означити ключові вимоги до візуалізації, моделювання і передачі даних у режимі, наближеному до реального часу.

У центрі уваги документа – оцінка візуалізаційної точності (fidelity) цифрових моделей, яку описано через просторову та часову роздільність, рівень деталізації (LoD) і якість відповідності між проектною моделлю (наприклад, САД) та фактичним виробом, отриманим у процесі виробництва. У звіті розглянуто методи перевірки цієї відповідності, зокрема через лазерне сканування, побудову хмар точок і аналіз відхилень. Також окреслено аспекти життєвого циклу iDTw – від концептуального проектування до обслуговування готового виробу з використанням великих експлуатаційних даних. Документ проводить чітке розмежування між iDTw, кіберфізичними системами (CPS) і доповненою реальністю (AR), аналізуючи подібності та відмінності архітектур, ролі користувача, рівнів моделювання і джерел даних. У звіті подано низку прикладів застосування систем iDTw.

Технічний звіт також цінний своїм оглядом стандартів та каркасів ЦД. Зокрема, у Додатку С подано аналіз ключових міжнародних стандартів, пов'язаних з ЦД. У звіті розглянуто також концепцію цифрового потоку (digital thread) та підходи до оцінювання зрілості ЦД на основі багаторівневих моделей. Таким чином, стандарт ISO/TR 24464:2025 не лише формулює архітектурні та візуалізаційні основи ЦД, а й слугує своєрідним дороговказом у потоці сучасної

стандартизації, пропонуючи уніфіковану точку входу для проєктувальників, розробників і дослідників ЦД.

4. Фундаментальні означення системи цифрових двійників

Спочатку дамо означення цифрового двійника відповідно до трьох стандартів, які аналізуються.

- У ISO/IEC 30173 ЦД (digital twin, DTw) – це цифрове представлення цільової сутності з каналами передачі даних, які забезпечують узгодження фізичного й цифрового станів із відповідною швидкістю синхронізації. З погляду понять, ЦД є частковим випадком цифрової сутності.

- Згідно з ISO 23247-1 для виробництва, ЦД (digital twin) – це цифрове подання спостережуваного виробничого елемента, придатне для визначеної мети, із синхронізацією між цим елементом та його цифровим поданням. У свою чергу, цифрове подання (digital representation) – це елемент даних, що є набором властивостей спостережуваного елемента виробництва.

- У стандарті IEC 63278-1 немає означення ЦД, натомість оболонку адміністрування активів (Asset Administration Shell) розглянуто як інтероперабельну реалізацію ЦД у виробництві, яка сприяє тіснішій інтеграції як у межах кожного виміру, так і між ними. У свою чергу, оболонка адміністрування активів (Asset Administration Shell, AAS) є стандартизованим цифровим представленням активу. Про це також говориться в стандарті ISO/IEC 30173. Однак під час детального розгляду AAS стає зрозумілим, що AAS містить не лише ЦД, а й інші складові, які відокремлюються в ISO/IEC 30173 та в ISO 23247-1. Крім того, відсутність явного означення ЦД у стандарті та згадка його тільки в одному місці свідчить про те, що він більше розрахований саме на концепт розумного виробництва, а не на ЦД.

Кожне з наведених означень у будь-якому разі представляє якусь сутність в реальному світі. Наведемо означення цієї сутності у стандартах:

- У ISO/IEC 30173 це є цільовою сутністю (target entity), що виконує певну функцію в реальному світі та є об'єктом цифрового представлення. У свою чергу цільові сутності можуть бути як фізичними (які є у реальному світі і можуть бути об'єктами впливу чи вимірювання), так і цифровими (що складається з елементів даних і процедурних елементів). Тому формаль-

но ЦД, який є цифровою сутністю, може бути репрезентацією іншої цифрової сутності. У цьому немає нічого тавтологічного, наприклад програма у ПЛК може моделюватися іншою програмою, наприклад в Simulink.

- Згідно з ISO 23247-1 використовується термін спостережуваний виробничий елемент (observable manufacturing element, OME) – елемент, що має на виробництві спостережувану фізичну присутність (наприклад, персонал, обладнання, матеріали) або спостережуване функціонування (наприклад, робочий процес, температурні умови, облік документації).

- Згідно зі стандартами IEC 63278-1 AAS асоціюється з активом (asset) – сутність (окрема, композитна, група об'єктів), яка належить організації або перебуває під її опікою і яка має фактичну або передбачувану цінність для цієї організації. Сутність може бути як фізичною (наприклад, обладнання, сировина, деталі, витратні матеріали і т. п.), так і цифровою (ПЗ) чи нематеріальною (наприклад, ліцензія на ПЗ).

З наведених вище означень видно, що ці поняття мають схожість, однак ISO/IEC 30173 є більш загальним, тоді як ISO 23247 та IEC 63278 стосуються виключно виробництва. Надалі для узагальнення понять будемо використовувати означення з ISO/IEC 30173, тобто «цифровий двійник» (у вигляді цифрової сутності) та «цільова сутність». Обидві сутності функціонують у парі через двосторонній зв'язок, саме наявність такого зв'язку відрізняє його від інших подібних концепцій [1–7]. У ISO/IEC 30173 написано, що взаємодія між цифровою та цільовою сутністю має бути безперервною у межах прийнятної частоти синхронізації протягом усього життєвого циклу цифрової сутності. Нижче наведемо приклади, як цей зв'язок відображено в стандартах.

- У технічному звіті ISO/TR 24464, у якому значну увагу приділено огляду стандартів та концепцій ЦД, явно виділено двійникування (twinning interface) – це посередник, який забезпечує взаємне підсилення між ЦД та його цільовою сутністю. У інших стандартах явно виділеного поняття немає.

- У ISO/IEC 30173 є загальна фраза, що між цільовими та цифровими (двійник) сутностями відбувається з'єднання, а саме збір даних із фізичної сфери, оптимізація в цифровій сфері, прийняття рішень і внесення змін у фізичну сферу на основі цих рішень. У контексті взаємодії використовується слово «синхронізація».

- Згідно з ISO 23247-1 поняття синхронізації виділено явно, яке передбачає, що ЦД і його спостережуваний виробничий елемент мають бути оновлені до значення один одного за допомогою відповідного методу. Метод може бути подієвим або періодичним. Надалі слово синхронізація використовується в усіх контекстах різного представлення частин каркасу.

- Відповідно до стандарту IEC 63278-1, у межах AAS, як архітектурної реалізації ЦД, синхронізація не виділена як обов'язкова. Її можливо реалізувати, але вона залежить від контексту, засобів доступу, а також від технічних можливостей активу. Наприклад, якщо актив є машиною, він може мати сервіси, які надаються оболонці через інтеграцію активу. Якщо актив є пасивним, сервіси можуть надаватися іншим способом, що виходить за межі стандарту. Це відрізняє AAS-підхід від більш повноцінного ЦД, де синхронізація – це центральна властивість системи з ЦД.

5. Загальне подання системи цифрових двійників

На рис. 1–3 показано три різні схеми, які репрезентують архітектуру ЦД відповідно до трьох ключових стандартів – ISO/IEC 30173, ISO 23247 та IEC 63278 (AAS). Вони ілюструють різні способи організації компонентів системи ЦД та рівні деталізації.

Рис. 1 (ISO/IEC 30173) подає концептуальну модель системи ЦД як гібридної системи, що включає з'єднання даних між ними, а також моделей, даних та інтерфейсів, задіяних у процесі передавання даних. Система ЦД може використовувати API та інші інтерфейси для обміну даними. Водночас вона може взаємодіяти із зовнішніми модулями (наприклад, інфраструктурою) також через API або інші інтерфейси. Цифровий двійник може мати функції підключення, інтеграції, аналізу, моделювання, візуалізації, оптимізації тощо. У конкретних прикладних сценаріях система ЦД може надавати сервіси, зокрема віртуальну та фізичну інтеграцію, аналіз стану, фізичне й імітаційне моделювання, оптимізацію продуктивності. Інфраструктура – це невід'ємний компонент підтримки, необхідний для забезпечення нормальної роботи системи ЦД, яка охоплює датчики, виконавчі механізми, мережі, геоінформаційні системи тощо. До системних аспектів належить інтеграція, керування, безпека й конфіденційність, а також етика роботи з даними,

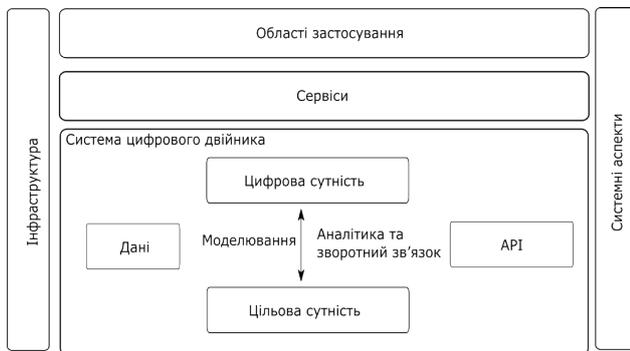


Рис. 1. Контекст системи ЦД згідно з ISO/IEC 30173

які забезпечують гармонійне співіснування системи ЦД з іншими системами в екосистемі. Область застосування — це фактично застосунки, які користуються сервісами, що у свою чергу ґрунтуються на системі ЦД.

Тепер розглянемо каркас ЦД з ISO 23247, який показано на рис. 2. Він деталізує архітектуру ЦД у контексті виробництва. Тут подано окремі сутності, включно з пристроями збору даних, ЦД, сервісними підсистемами, користувачами та крос-системними функціями. Важливим є чітке розділення функціональних областей та орієнтація на IoT-каркас ISO/IEC 30141, що робить можливим меппінг на загальну модель Інтернету речей.

Функціональна архітектура ЦД, запропонована у стандарті ISO 23247-2, структурована як набір взаємодіючих сутностей (entities), кожна з яких виконує визначені функціональні ролі. Центральною у моделі є сутність ЦД (Digital Twin Entity), яка здійснює побудову цифрового подання фізичних об'єктів, виконує синхронізацію станів, моделювання, аналітику, візуалізацію та надає сервіси іншим системам. Ця сутність поділена на три підсистеми: Operation and Management (для репрезентації, підтримки й синхронізації), Application and Service (для симуляції, звітності, аналітики) та Resource Access and Interchange (для керування доступом, інтеграції та інтероперабельності та інтеграції з іншими системами).

Взаємодія з фізичним виробничим середовищем реалізується через сутність Device Communication Entity, яка поділена на підсистеми збору даних (Data Collection) та керування пристроями (Device Control). Вони забезпечують зчитування інформації з виробничих об'єктів, попередню обробку сигналів, а також передачу керувальних команд. Спеціально виокремленою є користувацька сутність (User Entity), що реалізує інтерфейс для людини або зовніш-

ніх програмних засобів (наприклад, MES, ERP, HMI).

Додатково у структурі передбачена Cross-System Entity — допоміжна функціональна група, яка забезпечує міжсистемну узгодженість. Вона містить функції перетворення даних (Data Translation), забезпечення якості даних (Data Assurance) та підтримки безпеки (Security Support). В основі всієї архітектури — спостережувані виробничі елементи (Observable Manufacturing Elements), що є фізичними об'єктами, з яких збираються дані і для яких створюється цифрове відображення. Для кожного типу таких об'єктів можуть застосовуватись специфічні функціональні елементи, що враховують особливості домену.

На рис. 3 показано структуру Asset Administration Shell (IEC 63278) як цифрового представлення активу. Вона містить тільки підмоделі, які відповідають за представлення різноманітної інформації, та інтерфейс для взаємодії.

Аналіз отриманих результатів

Аналіз базової термінології та структури каркасів зі стандартів ISO 23247:2021, ISO/IEC 30173:2023 та IEC 63278-1:2023 проведено в п. 4. Тут розглянемо сумісність концепцій ЦД у цих стандартах.

Щодо ISO/IEC 30173 варто зробити кілька зауважень. По-перше, у стандарті здебільшого неявно, в контексті пояснення архітектури, ототожнюються терміни «цифровий двійник» та цифрова сутність, це видно на рис. 1. По-друге, таке саме ототожнення інколи відбувається між системою ЦД та ЦД, що вносить значну плутанину в розуміння і трактування. По-третє, система ЦД містить обидві сутності — і цифрову, і цільову. Це важливо під час трактування. По-четверте, система ЦД містить дані та API як відособлені компоненти, при цьому немає окремого компонента «модель», натомість вони можуть бути частиною (ніде не вказано, що мають) цифрової сутності. По-п'яте, за збір та обмін даними відповідає інфраструктура, і це не є частиною системи ЦД.

Порівнюючи архітектуру ISO 23247 та ISO/IEC 30173 важко їх приводити до спільного знаменника. За ідеологією розробників ISO/IEC 30173, структура, наведена на рис. 1, мала б стати парасолькою для всіх стандартів, включно з ISO 23247. Однак вони суттєво відрізняються. Виділимо однозначно схожі частини:

- обидва виділяють рівень застосунків: користувацька сутність (ISO 23247) та домени застосунків (ISO/IEC 30173);
 - крос-системні сутності з ISO 23247 здебільшого перекриваються з інфраструктурою та системними аспектами з ISO/IEC 30173.
- Щодо критичних відмінностей, виділимо такі:
- згідно з ISO 23247, сутність ЦД бере на себе усі функції, які згідно з ISO/IEC 30173 належать до системи ЦД (окрім цільової сутності) і сервісів;

- в ISO 23247 OME не є частиною каркасу, а згідно з ISO/IEC 30173 цільова сутність є частиною системи ЦД;
 - в ISO 23247 явно виділена сутність комунікації з пристроєм, тоді як в ISO/IEC 30173 така функція явно не виділена, а є частиною інфраструктури.
- Очевидно такі відмінності пов'язані з генетичними зв'язками ISO 23247 зі стандартами IoT. Водночас може здатися, що ці представлення порівнювати недоречно, оскільки

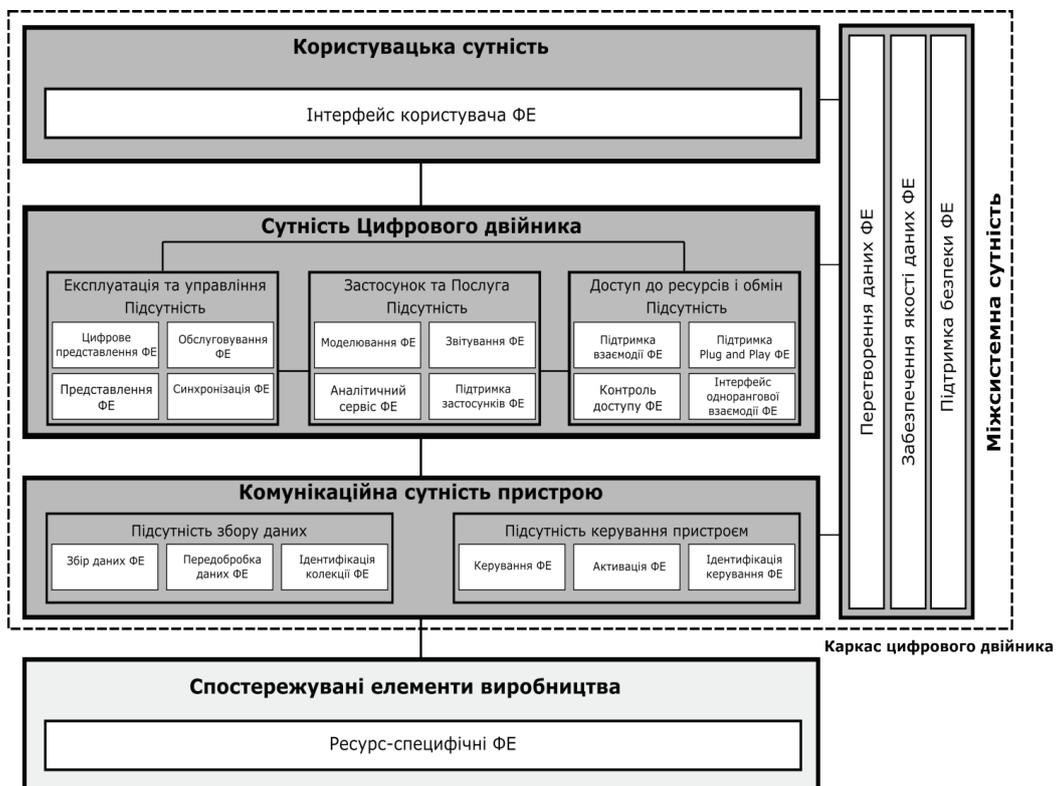


Рис. 2. Функціональний вигляд каркасу ЦД для виробництва;
ФЕ – функціональний елемент

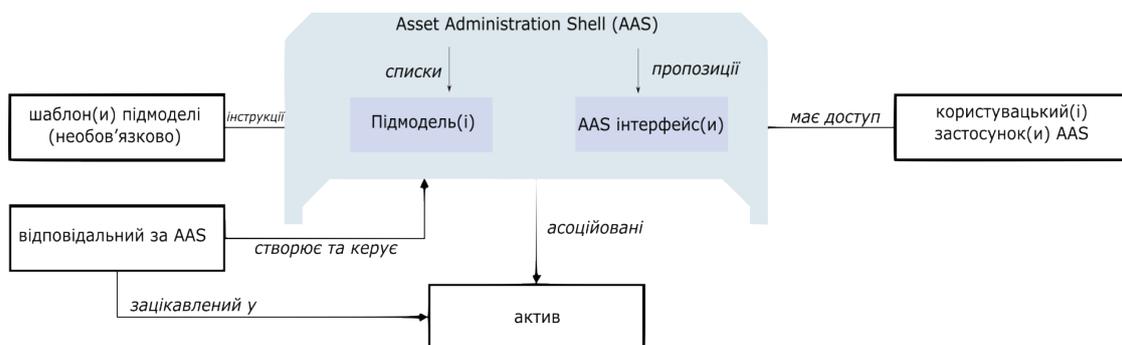


Рис. 3. Огляд оболонки адміністрування активів та пов'язаних сутностей

в ISO 23247 показано функціональний вигляд, а в ISO/IEC 30173 – контекстну діаграму. Тут варто зауважити, що функціональний вигляд, що наданий ISO/IEC 30173, взагалі є частковою інтерпретацією.

Оболонка AAS з IEC 63278-1 містить тільки підмоделі, які відповідають за представлення різноманітної інформації, та інтерфейс для взаємодії. Усе інше, що наведено в ISO/IEC 30173 та ISO 23247, або є частиною цих складових, або знаходяться поза оболонкою.

Висновки

У процесі дослідження було здійснено комплексний аналіз ключових міжнародних стандартів, присвячених ЦД, зокрема ISO/IEC 30173:2023, ISO 23247:2021 (усі чотири частини), IEC 63278-1:2023, ISO/IEC TR 30172:2023 та ISO/TR 24464:2025 та їх порівняння. Розгляд проводився через призму їх застосовності, визначення ключових термінів, бачення структури ЦД та стандартів, на яких вони ґрунтуються.

Проаналізовані документи охоплюють різні аспекти концепції ЦД: термінологію, архітектуру, інтерфейси, життєвий цикл, інформаційні моделі, приклади застосування та візуалізацію. Було встановлено, що, попри декларовану спільну мету, а саме підтримку створення, впровадження та уніфікації ЦД, розглянуті стандарти значною мірою не узгоджені між собою і не можуть бути використані в межах єдиного проєктного підходу без істотної адаптації.

З формального погляду, суперечностей між ISO/IEC 30173, ISO 23247 та IEC 63278 немає, всі три стандарти розглядають ЦД як синхронізоване цифрове представлення фізичної сутності. Однак аналіз їхніх підходів до структуризації каркасу ЦД свідчить про фундаментальні розбіжності. Наприклад, ISO 23247 формує архітектуру на основі ролей у виробничому середовищі, відокремлюючи користувацькі, пристроєві та цифрові домени, тоді як IEC 63278 ґрунтується на концепції Asset Administration Shell (AAS) як цифрової обгортки навколо активу, що уособлює ЦД як контейнер для субмоделей. Зі свого боку, ISO/IEC 30173 надає концептуальний каркас, який є значно вищого рівня абстракції, не передбачаючи конкретної

реалізації, але означаючи структуру та вказуючи на необхідність синхронізації.

Таким чином, спроба спільного використання цих стандартів у межах одного життєвого циклу ЦД, наприклад, побудови цифрової нитки або міжплатформної інтеграції є непридатною без адаптаційного шару, який би мапував відмінності у представленнях цифрових сутностей, життєвих циклів, моделей взаємодії та інтерфейсів. Кожен зі стандартів відображає бачення своєї технічної спільноти (ІТ-сфери, промислової автоматизації, або розробників IoT-рішень) і не був розроблений із урахуванням взаємної інтеграції.

Натомість перевагою сучасної ситуації є наявність різноманітних підходів, що дає можливість обирати стандарти залежно від сфери застосування. ISO 23247 добре підходить для сценаріїв «smart manufacturing» з використанням платформ IoT, IEC 63278 – для машинобудування з акцентом на сервіси і структури активів та реалізації за місцем, ISO/IEC 30173 – як база для термінологічної узгодженості та системного мислення.

Перспективи подальших досліджень вбачаються:

- у побудові інтерпретаційного шару між стандартами для забезпечення семантичної сумісності; це можуть зробити тільки в межах технічних комітетів, оскільки багато змісту залишається поза офіційним документом і його важко сприймати;
- у створенні профілів впровадження для конкретних галузей (наприклад, харчова промисловість, енергетика), які обирають відповідний стандарт як основний, але інтегрують елементи інших;
- у формуванні методичних рекомендацій для вибору та впровадження стандарту ЦД відповідно до рівня складності системи, потреб життєвого циклу та наявної інфраструктури.

З огляду на це, практичне впровадження стандартів потребує не лише технічного адаптаційного середовища, а й координації між технічними комітетами ISO, IEC, ITU, IEEE та активної участі промислових консорціумів (DTC, PIC). Без цього процес стандартизації може втратити функцію рушія розвитку й додатково ускладнити роботу для розробників і впроваджувачів ЦД.

References

- [1] M. Grieves, Completing the Cycle: Using PLM Information in the Sales and Service Functions [Slides]. *In SME Management Forum*, 2002. Troy, MI.
- [2] G. Shao *et al.*, (2024). Digital Twins for Advanced Manufacturing: The Standardized Approach. In: Grieves, M., Hua, E.Y. (eds) *Digital Twins, Simulation, and the Metaverse. Simulation Foundations, Methods and Applications*. Springer, Cham, USA. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69107-2_7
- [3] G. Shao *et al.*, (2023). An Analysis of the New ISO 23247 Series of Standards on Digital Twin Framework for Manufacturing, 2023 MSEC Manufacturing Science & Engineering Conference, New Brunswick, NJ, US, [Online]. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=935765
- [4] K. Wang *et al.*, A review of the technology standards for enabling digital twin [version 2; peer review: 2 approved]. *Digital Twin* 2022, 2:4, China. <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17549.2>
- [5] B.R. Barricelli *et al.*, A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications, *in IEEE Access*, Italy. vol. 7, pp. 167653–167671, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953499
- [6] S.M.M. Sajadieh and S.D. Noh, “From Simulation to Autonomy: Reviews of the Integration of Artificial Intelligence and Digital Twins”, *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* (2025), South Korea. <https://doi.org/10.1007/s40684-025-00750-z>
- [7] Angira Sharma *et al.*, “Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions”, *Journal of Industrial Information Integration*, United Kingdom, vol. 30, 100383 p., 2022, ISSN 2452-414X, <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383>
- [8] ISO/IEC 30173 – Digital twin – Concepts and terminology.
- [9] ISO 23247-1 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing. Part 1: Overview and general principles.
- [10] ISO 23247-2 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing Part 2: Reference architecture.
- [11] ISO 23247-3 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing Part 3: Digital representation of manufacturing elements.
- [12] ISO 23247-4 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing Part 4: Information exchange.
- [13] IEC 63278-1 – Asset Administration Shell for industrial applications – Part 1: Asset Administration Shell structure.
- [14] ISO/IEC TR 30172:2023 – Internet of things (IoT) – Digital twin – Use cases TECHNICAL REPORT.
- [15] ISO TR 24464:2025 – Visualization elements of digital twin – Visualization fidelity.

O.M. Pupena, O.M. Klymenko, V.V. Polupan

SYSTEMATIZATION OF KEY STANDARDS FOR DIGITAL TWINS IN INDUSTRIAL MANUFACTURING

Background. A cohesive set of tools, methodologies, and, most importantly, a uniform conceptual framework are essential for the development and scaling of digital twins (DT). Given that the standards in this domain are still emerging, awareness of them is notably limited, and their content can often be challenging to understand.

Objective. The purpose of the work is to acquire responses to inquiries regarding the standards that are directly associated to DTs in the manufacturing sector, including their purpose, content, and application, as well as the feasibility of their combined utilization.

Methods. To fulfil the specified objective, an examination was conducted of publicly accessible scientific articles that reflect the viewpoints of different scientific schools. Special emphasis was placed on proceedings that focused on the topics of unification and standardization of DTs. A comprehensive re-view and systematisation of the primary principles of current standards were performed, the classification of essential terminology and structural components was undertaken, and the applicability of each standard within the framework of industrial DTs was established.

Results. The research process encompassed a thorough examination of essential international standards regarding DTs, which included ISO/IEC 30173:2023, ISO 23247:2021 (all four parts), IEC 63278-1:2023, ISO/IEC TR 30172:2023, and ISO/TR 24464:2025. A comparison was made of the main terminology concerning DTs, the target entity, and their interrelation; structural representations of DTs; concepts of DT life cycles; application domains of DTs; their relationship with other standards; and the feasibility of their combined application.

Conclusions. Although, from a formal point of view, there are no explicit contradictions between the ISO/IEC 30173, ISO 23247, and IEC 63278 standards, the analysis of their approaches to constructing DT frameworks revealed fundamental differences in their conceptual apparatus, the structure of DTs, and the underlying standards on which they rely. This results in the conclusion that utilizing them concurrently within a single DT life cycle is unfeasible unless an extra adaptation layer is implemented to guarantee their compatibility.

Keywords: digital twin; target entity; digital twin standards; life cycle; IoT.

Рекомендована Радою
навчально-наукового Інституту атомної та теплової
енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
22 червня 2025 року

Прийнята до публікації
08 вересня 2025 року

АВТОРИ НОМЕРА

Боднарук Андрій Васильович
ORCID: 0000-0002-8280-0209

Бурмак Андрій Петрович
ORCID: 0000-0003-2415-8032

Владимирський Ігор Анатолійович
ORCID: 0000-0002-2106-9176

Волошко Світлана Михайлівна
ORCID: 0000-0003-3170-8362

Ворон Михайло Михайлович
ORCID: 0000-0002-0804-9496

Дубіковський Олександр Володимирович
ORCID: 0000-0002-1504-8440

Клименко Олег Миколайович
RCID: 0000-0002-3525-7805

Круглов Іван Олександрович
ORCID: 0000-0003-2078-4159

Педань Роман Васильович
ORCID: 0009-0004-9932-4079

Полупан Володимир Володимирович
ORCID: 0009-0007-8076-1369

Полуциганова Вікторія Ігорівна
ORCID: 0000-0002-9729-5786

Пупена Олександр Миколайович
ORCID: 0000-0001-9089-8325

Сахаров Сергій Юрійович
ORCID: 0009-0001-0943-023X

Смирнов Сергій Анатолійович
ORCID: 0000-0003-4190-5204

Франчік Наталія Володимирівна
ORCID: 0000-0002-7041-874X

Фурманюк Яків Геннадійович
ORCID: 0009-0009-0787-4652

Циганок Віталій Володимирович
ORCID: 0000-0002-0821-4877

Чертов Олег Романович
ORCID: 0000-0003-0087-1028

Щьоголев Максим Олегович
ORCID: 0000-0002-3267-6617

Яворський Юрій Васильович
ORCID: 0000-0003-1814-6844