ISSN 3083-6573 Print
ISSN 3083-6581 Online

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ

IT&S

INFORMATION TECHNOLOGIES & SYSTEMS

4(10)
2026

TOPICS

- IMPLICIT SURFACE MODELING
- SEMANTIC SEARCH OF TEXT DOCUMENTS
- INTELLIGENT ASSESSMENT OF THE QUALITY OF OPEN DATA

***Editor-in-Chief*:** O.M. KHIMICH, (Kyiv, Ukraine)

***Deputies Editor-in-Chief*:** O.Ye. VOLKOV, (Kyiv, Ukraine),
Ye.A. SAVCHENKO-SYNIAKOVA, (Kyiv, Ukraine)

***Editorial Board*:** A.M. ogly Abbasov (Baku, Azerbaidzhan), I.Ye. Andrushchak (Lutsk, Ukraine); I. Vlahavas (Thessaloniki, Greece); A.M. Hlibovets (Kyiv, Ukraine); V.F. Gubarev (Kyiv, Ukraine); L.F. Hulianytskyi (Kyiv, Ukraine); V.V. Zosimov (Odesa, Ukraine); S.L. Kryvyi (Kyiv, Ukraine); V.I. Lytvynenko (Kyiv, Ukraine); O.V. Palagin (Kyiv, Ukraine); S.D. Pogorilyy (Kyiv, Ukraine); B. Savchynskyy (Heidelberg, Germany); V.S. Stepashko (Kyiv, Ukraine), I.V. Surovtsev (Kyiv, Ukraine)

***Responsible Executor*:** H.O. Pezentsali
***Editors*:** N.A. Charchiyan, A.Yu. Vitchenko, O.O. Lysenko
***Computer Group*:** O.V. Tupalskiy, N.S. Stashkova
***Technical editing and desktop layout*:** N.M. Kovalenko

Media ID R30-05899
Editorial address: Institute of Information Technologies and Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine,
40, Hlushkova Akd. ave., Kyiv, 03187
phone: +380 (44) 526-00-09, e-mail: its.journal.ua@gmail.com,
https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/its

***Головний редактор*:** О.М. ХІМІЧ (Київ, Україна)

***Заступники головного редактора*:** О.Є. ВОЛКОВ (Київ, Україна),
Є.А. САВЧЕНКО-СИНЯКОВА (Київ, Україна)

***Редакційна колегія*:** А.М. огли Аббасов (Баку, Азербайджан), І.Є. Андрущак (Луцьк, Україна); І. Влахавас (Салоніки, Греція); А.М. Глибовець (Київ, Україна); В.Ф. Губарев (Київ, Україна); Л.Ф. Гуляницький (Київ, Україна); В.В. Зосімов (Одеса, Україна); С.Л. Кривий (Київ, Україна); В.І. Литвиненко (Київ, Україна); О.В. Палагін (Київ, Україна); С.Д. Погорілий (Київ, Україна); Б. Савчинський (Гейдельберг, Німеччина); В.С. Степашко (Київ, Україна), І.В. Суровцев (Київ, Україна)

***Відповідальний виконавець*:** Г.О. Пезенцалі
***Редактори*:** Н.А. Чарчіян, А.Ю. Вітченко, О.О. Лисенко
***Комп'ютерна група*:** О.В. Тупальський, Н.С. Сташкова
***Технічне редагування та комп'ютерна верстка*:** Н.М. Коваленко

Ідентифікатор медіа: R30-05899
Адреса: Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, м. Київ,
Просп. Акад. Глушкова, 40, 03187
Телефон: 526-00-09, e-mail: its.journal.ua@gmail.com,
Сайт: https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/its/

Підп. до друку 05.11.2026 р. Формат 70 × 108/16. Гарн. Book Antiqua.
Ум. друк. арк. 10,68. Обл.-вид. арк. 10,66. Тираж 66 пр. Зам. № 8220

Видавець і виготовлювач ВД «Академперіодика» НАН України
01024, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
INSTITUTE OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS
V.M. GLUSHKOV INSTITUTE OF CYBERNETICS

INFORMATION TECHNOLOGIES & SYSTEMS

4 (10) 2026

ACADEMIC AND RESEARCH JOURNAL
FOUNDED IN JANUARY 2025
PUBLISHED 6 TIMES PER YEAR
KYIV

CONTENTS

In memory of Academician Ivan Serhiienko 3

In memory of Mykhailo Schlesinger 5

Theory of Information Technologies and Systems Construction

Ausheva N.M., Sydorenko Iu.V., Kaleniuk O.S., Saiapin S.P. Using the Fourier Polynomial with Fractional Terms for Implicit Surface Modeling 7

Intellectual Information Technologies

Valkman R.Yu., Lagoda O.P., Rodionov O.O. Wolf Pack Algorithm for UAV Swarm Control: a Review and Opportunities for Modification 16

Komar M.M., Simakhin V.M., Popov I.V. Analysis of Methods and Means for Offline Processing of Airborne Camera Image Sequences 43

Bulgakova O.S. From Individual Candidate Suitability to Expert Panel Composition in Complex Systems Reengineering 54

Ivanchenko O.G., Kolomarenko D.O. Semantic Search of Text Documents 68

Motorniuk S.O. Method of Intelligent Assessment of the Quality of Open Data with Automated Generation of Recommendations and Reports 81

Computer Vision and Pattern Recognition

Dukhnovska K.K., Holub T.I. AI Image Detection Using an Ensemble of Efficientnet, Resnet, and Vision Transformer 99

Digital Computer Systems

Kokhan K.O. Productivity of Technology Optimum Configurations for Automated Testing of Rich Component Systems 112

Author Guidelines 120

© Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine, 2026
© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2026

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМ
ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ ІМЕНІ В.М. ГЛУШКОВА

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ & СИСТЕМИ

4 (10) 2026

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
ЗАСНОВАНО В СІЧНІ 2025
ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ НА РІК
КИЇВ

ЗМІСТ

Пам'яті академіка І.В. Сергієнка 3
Пам'яті М.І. Шлезінгера 5

Теорія побудови інформаційних технологій та систем

Ausheva N.M., Sydorenko Iu.V., Kaleniuk O.S., Saiapin S.P. Using the Fourier Polynomial with Fractional Terms for Implicit Surface Modeling 7

Інтелектуальні інформаційні технології

Валькман Р.Ю., Лагода О.П., Родіонов О.О. Алгоритм вовчої зграї для задач керування роєм безпілотних систем: огляд та можливості модифікації 16

Комар М.М., Сімахін В.М., Попов І.В. Аналіз методів та засобів офлайн оброблення послідовностей зображень з бортової камери 43

Bulgakova O.S. From Individual Candidate Suitability to Expert Panel Composition in Complex Systems Reengineering 54

Ivanchenko O.G., Kolomarenko D.O. Semantic Search of Text Documents 68

Моторнюк С.О. Метод інтелектуального оцінювання якості відкритих даних із автоматизованим генеруванням рекомендацій та звітів 81

Комп'ютерний зір та розпізнавання образів

Dukhnovska K.K., Holub T.I. AI Image Detection Using an Ensemble of Efficientnet, Resnet, and Vision Transformer 99

Цифрові комп'ютерні системи

Кохан К.О. Продуктивність технології оптимальних конфігурацій для автоматизованого тестування багатокомпонентних систем 112

Author Guidelines 120

© Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, 2026
© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026

ПАМ'ЯТІ АКАДЕМІКА СЕРГІЄНКА ІВАНА ВАСИЛЬОВИЧА



28 липня 2026 р. пішов з життя визначний науковець у галузі інформатики, теорії оптимізації та комп'ютерних технологій колишній директор Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, академік НАН України Іван Васильович Сергієнко.

І.В. Сергієнко — визначний науковець у галузі інформатики, теорії оптимізації та комп'ютерних технологій, доктор фізико-математичних наук (1972), професор (1973), академік НАН України (1988), лауреат Державної премії СРСР (1981), премії Ради Міністрів СРСР (1982), державних премій України в галузі науки і техніки (1972, 1993, 1999, 2005), премій НАН України імені В.М. Глушкова (1986), ім. С.О. Лебедєва (1997), ім. В.С. Михалєвича (2002), ім. А.О. Дородніцина (2007), ім. М.М. Амосова (2017), Заслужений діяч науки і техніки України (1991). Нагороджений орденом Дружби народів, орденами «За заслуги» I, II і III ступеня.

І.В. Сергієнко був автором понад 800 наукових праць, зокрема 55 монографій. Йому належать фундаментальні дослідження математичних моделей і методів оптимізації, теорії стійкості дискретних оптимізаційних задач. Створений ним метод вектора спаду сприяв побудові сімейства швидких алгоритмів для розв'язання надскладних багатоекстремальних задач і виявився універсальним математичним інструментом, застосовним у проєктуванні інтегральних мікросхем, плануванні гнучких виробничих систем, оптимізації транспортних потоків та логістики.

Довгий час Іван Васильович був головним редактором журналу «Кібернетика та обчислювальна техніка», юридичним спадкоємцем якого є журнал "Information Technologies and Systems".

Редакційний штат та колегія висловлюють щире співчуття його колегам, рідним та близьким.

In Memory of Academician Ivan Serhiienko

April On July 28, 2026, Ivan Vasylyovych Serhiienko — a Distinguished Scientist in the fields of Computer Science, Optimization Theory, and Computer Technologies, former Director of the V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences (NAS) of Ukraine, and Academician of the NAS of Ukraine — passed away.

I.V. Serhiienko was a Prominent Scientist in the fields of Computer Science, Optimization Theory, and Computer Technologies; a Doctor of Physical and Mathematical Sciences (1972), Professor (1973), and Academician of the NAS of Ukraine (1988). He was a laureate of the USSR State Prize (1981), the USSR Council of Ministers Prize (1982), State Prizes of Ukraine in Science and Technology (1972, 1993, 1999, 2005), and NAS of Ukraine prizes named after V.M. Glushkov (1986), S.O. Lebedev (1997), V.S. Mikhalevich (2002), A.O. Dorodnitsyn (2007), and M.M. Amosov (2017). He held the title of Honored Worker of Science and Technology of Ukraine (1991) and was awarded the Order of Friendship of Peoples and the Order of Merit (1st, 2nd, and 3rd classes).

I.V. Serhiienko authored over 800 scientific works, including 55 monographs. He conducted fundamental research on mathematical models and optimization methods, as well as on the stability theory of discrete optimization problems. For many years, Ivan Vasylyovych served as the editor-in-chief of the journal "Cybernetics and Computer Engineering", the legal successor to which is the journal "Information Technologies and Systems".

The Editorial Staff and Editorial Bboard extend their sincere condolences to his colleagues, family, and loved ones.

ПАМ'ЯТІ
МИХАЙЛА ІВАНОВИЧА ШЛЕЗІНГЕРА



27 липня 2026 р. пішов з життя Михайло Іванович Шлезінгер, доктор фізико-математичних наук, професор, визначний фахівець у галузі обробки зображень та розпізнавання образів, двічі лауреат Державної премії України (1988, 1997), головний науковий співробітник Інституту інформаційних технологій та систем НАН України.

М.І. Шлезінгер був видатним українським вченим в галузі інтелектуальних інформаційних технологій, теорії розпізнавання образів та зображень, автором більш ніж двохсот наукових праць. Його роботи, присвячені теорії формальних граматик, теорії самонавчання розпізнаванню образів, теорії структурного розпізнавання, широко відомі світовій науковій спільноті. Його монографії видано трьома мовами і стали класикою розпізнавання образів.

Під його науковим керівництвом та за його безпосередньою участю було виконано піонерські комп'ютерні розробки, зокрема перший у СРСР читаючий автомат «ЧАРС», автоматична система розпізнавання креслень великого розміру «Теремки», система ідентифікації особи за зображенням її обличчя.

Михайло Іванович був постійним членом редколегії журналів "Control Systems and Computers" та "Cybernetics and Computer Engineering", а з 2025 р. — журналу "Information Technologies and Systems", який об'єднав ці два журнали.

Редакційний штат та редколегія висловлюють щире співчуття його колегам, рідним та близьким.

In Memory of Mykhailo Schlesinger

On July 27, 2026, Mykhailo Ivanovych Schlesinger passed away. He was a Doctor of Physical and Mathematical Sciences, a Professor, a Distinguished Specialist in the fields of Image Processing and Pattern Recognition, a two-time Laureate of the State Prize of Ukraine (1988, 1997), and a Chief Researcher at the Institute of Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine.

M.I. Schlezinger was an Eminent Ukrainian Scientist in the fields of Intelligent Information Technologies and Pattern and Image Recognition Theory, and the author of over two hundred scientific works. His research on Formal Grammar Theory, Self-Learning in Pattern Recognition, and Structural Recognition Theory is widely recognized by the global scientific community. His monographs have been published in three languages and have become classics in the field of Pattern Recognition.

Mykhailo Ivanovych was a long-standing member of the Editorial Boards of the journals "Control Systems and Computers" and "Cybernetics and Computer Engineering", and, since 2025, the journal "Information Technologies and Systems", which merged these two journals.

The Editorial Staff and Editorial Board extend their sincere condolences to his colleagues, family, and loved ones.

THEORY OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS CONSTRUCTION

ТЕОРІЯ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМ

ttps://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.007
UDC 004.92

N.M. AUSHEVA, DSc (Engineering), Professor,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Beresteiskyi ave., Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-0816-2971
nataauscheva@gmail.com
Iu.V. SYDORENKO, PhD (Engineering), Associate Professor,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Beresteiskyi ave., Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-1953-0410
suliko3@ukr.net
O.S. KALENIUK, PhD (Engineering), Senior Lecturer,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Beresteiskyi ave., Kyiv, 03056, Ukraine
https://orcid.org/0009-0009-3141-4840
o.kaleniuk@kpi.ua
S.P. SAIAPIN, PhD (Economic), Associate Professor,
National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine,
15, Heroiv Oborony st., Kyiv, 03041, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-1565-4034
sayapin@nubip.edu.ua

USING THE FOURIER POLYNOMIAL WITH FRACTIONAL TERMS FOR IMPLICIT SURFACE MODELING

Implicit surfaces are widely used in computer modeling due to their ability to model complex objects with relatively little data. Also, in contrast with explicit ways of modelling, such as with triangle meshes and boundary representation of parametric surfaces, the implicit surfaces are guaranteed to keep continuity and smoothness under the operations of deformation or replication.

The explicit modeling, however, such as triangle mesh or boundary representation of parametric surfaces, is the de facto current standard of computer modeling. The problem of conversion from the explicit representation to an implicit one is therefore a cutting-edge engineering problem. New approaches and specific methods are published every year, including those that are based on machine learning or artificial intelligence in general.

Cite: Ausheva N.M., Sydorenko Iu.V., Kaleniuk O.S., Saiapin S.P. Using the Fourier Polynomial with Fractional Terms for Implicit Surface Modeling. Information Technologies and Systems. 4 (10). 2026. 7—15. https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.007

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

In this work, we explore the limits of a triangle mesh to implicit surface conversion based on Fourier polynomial approximation, although the polynomial we propose contains fractional terms. The prospects of using a polynomial with solely integer terms are limited by the Fourier polynomial's tendency to overfit. We show that adding fractional terms to the integer ones in a single function allows for reaching the modeling quality that could be satisfactory for some practical scenarios, while keeping the total amount of polynomial coefficients relatively small too.

In theory, using the Fourier polynomial with fractional terms could be used not only for smooth surface modeling but for smooth connection of different triply periodic surfaces along a selected plane due to the planned loss of periodicity along the normal axis. This, however, requires studying the question of specific per-axis polynomial configuration, which extends beyond the scope of this particular paper.

Keywords: *modeling, geometric modeling, Fourier polynomial, approximation, implicit surfaces, smooth surfaces.*

Introduction

One well-known method of turning an explicit geometric model, such as a triangle mesh, into an implicit surface is meta-balls [1] or similar meta-objects based on triangles [2]. An alternative, but also well-established, approach would be building an implicit surface as the convolution surface of a Gaussian kernel [3]. This approach can be extended to use other kernels as well.

A similar approach would be building implicit surfaces based on radial basis functions [4]. The target implicit surface is then an isosurface of a spatial interpolating function. To localize the influence of each radial basis function, and save computing time, respectively, as otherwise all basis functions would have been computed for every queried point in space, in practice, the compactly supported radial functions are often used instead of globally supported functions [5, 6].

Contemporary approaches usually rely on neural networks to represent a signed distance function of an implicit surface, or the occupancy probability for the target shape [7, 8]. The downsides of machine learning methods are high consumption of computer memory and processing time, both for training the neural network and computing the resulting model. This effect is more pronounced on highly detailed models, so to mitigate it, the neural networks are often enhanced by employing Fourier basis functions for greater detail [9, 10, 11].

The Fourier polynomial by itself is periodic and could be used for triply periodic surfaces modeling purely by itself, without neural networks or any other means of machine learning. A simple least squares approximation combined with an interpolating polynomial retrieved by solving a linear system often grants a viable result on its own [12].

Using the Fourier approximation alone to model non-periodic surfaces, however, is questionable not only due ot its periodicity, after all, every closed surface can be represented as a periodic one with its own bounding box dimensions being the per-axis periods, but mostly due to the Fourier polynomial tendency to overfit.

Problem Statement

Let there be a model of a 3D body presented by the triangle mesh of its surface, *TM*. The triangle mesh consists of n vertices $v_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1\ldots n$, and m trinagles $t_j = [v_{j1}, v_{j2}, v_{j3}]$, $j = 1...m$. The triangle mesh is closed, meaning that there is a clear distinction between the points in space lying inside the modeled body and the points outside. Topological inconsistencies that don't affect this distinction, such as non-manifold edges, duplicate triangles, or degenerate triangles, are allowed.

The function that defines a signed distance to *TM* for the value of every point in space is called a signed distance function: $SDF_{TM}(x, y, z)$. We expect the function to signify inner body points with a negative sign and outer ones with a positive. Of course, all points of the *TM* triangles have an SDF_{TM} value of 0.

Our goal is to find a function $F(x, y, z)$ that models the $SDF_{TM}(x, y, z)$ in the axis-oriented bounding box of a modeled body, specifically.

To oversee the overfitting effect, the quality of modeling should be assessed by the set of points and corresponding SDF_{TM} values independent from the ones used to find the $F(x, y, z)$.

Purpose of the Paper

This paper is meant to demonstrate how adding terms with fractional variable multipliers allows both to move away from periodicity and improve the modeling quality. With these terms, modeling smooth surfaces represented by triangle meshes with approximating Fourier polynomials becomes possible up to some level of accuracy, and this could be enough for some practical applications. The model then remains compact memory-wise and relatively simple to compute.

Results

The univariate Fourier polynomial is a partial sum of the Fourier series. The exact formula depends on whether the degree of the polynomial p is even (1) or odd (2):

$$F_e(x) = a_0 + a_1\cos(x) + a_2\sin(x) + \\ + a_3\cos(2x) + a_4\sin(2x) + \ldots + a_{p-1}\cos\left(\frac{p}{2}x\right) + a_p\sin\left(\frac{p}{2}x\right) \quad (1)$$

or

$$F_0(x) = a_0 + a_1\cos(x) + a_2\sin(x) + \\ + a_3\cos(2x) + a_4\sin(2x) + \ldots + a_p\cos\left(\frac{p+1}{2}x\right). \quad (2)$$

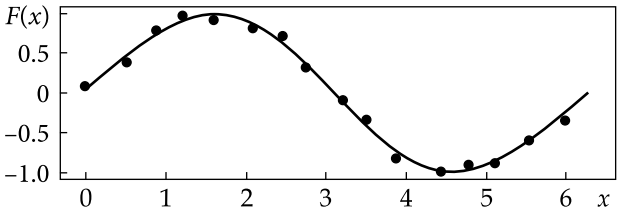


Fig. 1. A Fourier polynomial of degree 5 approximating the sine function represented by 16 points with random noise

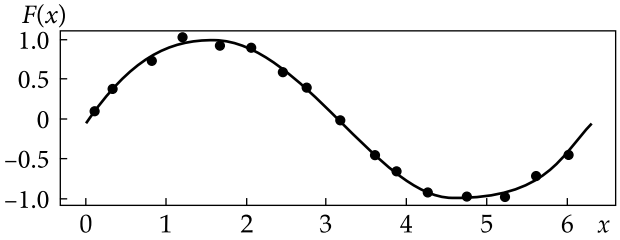


Fig. 2. A Fourier polynomial of degree 10 approximating the sine function represented by 16 points with random noise

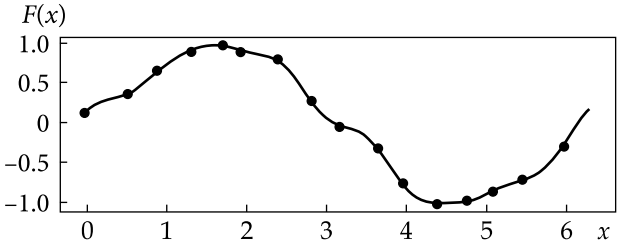


Fig. 3. A Fourier polynomial of degree 15 approximating the sine function represented by 16 points with random noise

This polynomial is periodic with period [0..2π]. It is also a single interpolating polynomial for a set of $p + 1$ points. And while the Fourier series converges to any algebraic function, the Fourier polynomial shows a tendency to overfit when using it to approximate a function by its values with noise (Fig. 1–3).

We can build a similar polynomial based on Fourier terms where the degree of the term becomes not a multiplier but a divisor of an argument in the corresponding trigonometric function (3), (4). Let's call this polynomial a fractional Fourier polynomial (FFP).

$$F_e(x) = a_0 + a_1\cos(x) + a_2\sin(x) + a_3\cos(x/2) + \\ + a_4\sin(x/2) + \ldots + a_{p-1}\cos\left(\frac{2x}{p}\right) + a_p\sin\left(\frac{2x}{p}\right). \quad (3)$$

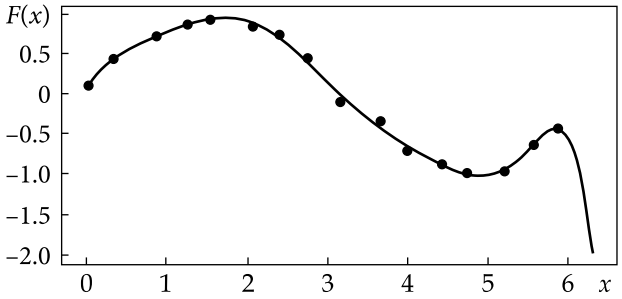


Fig. 4. An FFP of degree 15 approximating the sine function represented by 16 points with random noise

$$F_0(x) = a_0 + a_1\cos(x) + a_2\sin(x) + \\ + a_3\cos(x/2) + a_4\sin(x/2) + \ldots + a_p\cos\left(\frac{2x}{p+1}\right). \quad (4)$$

This polynomial shows less tendency to overfit (Fig. 4) but also loses the $[0..2\pi]$ periodicity. Of course, for the purpose of modeling a non-specific smooth surface given by a triangular mesh, periodicity isn't a desired property.

Experiments show, however, that this polynomial has less descriptive potential, especially regarding small model features. To mitigate this issue, we can build a polynomial that includes both regular Fourier terms (with multipliers) and fractional ones (with divisors) (5). Let's call this polynomial a Fourier polynomial with fractional terms (FPFT):

$$F(x) = a_0 + a_1\cos(x) + a_2\sin(x) + \ldots + \\ + a_{p-3}\cos\left(\frac{p+1}{4}x\right) + a_{p-2}\sin\left(\frac{p+1}{4}x\right) + a_{p-1}\cos\left(\frac{4x}{p+1}\right) + a_p\sin\left(\frac{4x}{p+1}\right). \quad (5)$$

To evaluate the descriptive potential of this polynomial, we conducted a series of computational experiments. As a prototype for modeling, we chose a triangle mesh representing a "Stanford bunny" (Fig. 5).

To model this particular mesh with FPFT implicit surface, we first rescaled the model so it would fit the $[-7/8\pi; 7/8\pi]\times[-7/8\pi; 7/8\pi]\times$ $\times[-7/8\pi; 7/8\pi]$ cube. The coefficient 7/8 was picked to retain a 1/4 margin in the $[-\pi;\pi]\times$ $\times[-\pi;\pi]\times[-\pi;\pi]$ cube, where otherwise we would have faced distortions caused by 2π-periodic terms of the FPFT.

Then, in the $[-\pi;\pi]\times[-\pi;\pi]\times[-\pi;\pi]$ cube, we generated a regular grid of points with own dimensions: 32 × 32 × 64. The last dimension is intentionally disproportionate so we could

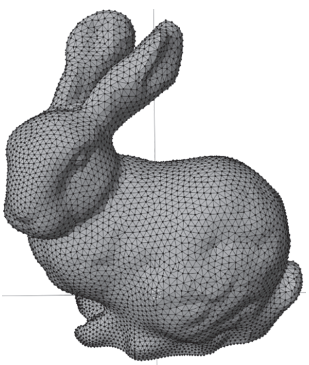


Fig. 5. A finely detailed triangle mesh of the "Stanford bunny"

easily divide the grid into two independent sets of points: one for approximation and the other for validation. Each even point of the grid, along with the signed distance value to the model from that point, was included in the approximation set. Each even point, along with its signed distance value, was included in the validation set.

Just like that, each even vertex of the source triangle mesh, along with value 0, joined the approximation set, and each even vertex, also with a signed distance value of 0, joined the validation set.

In our experiment, we tried all three polynomials: Fourier polynomial (FP), fractional Fourier polynomial (FFP) and Fourier polynomial with fractional terms (FPFT), each generalized to the tree argument function by using a full Cartesian product of its terms. Specifically, we tested polynomials (1), (3) and (5), all with odd degrees, specifically: 7, 11, 15, 19. Degree 7 was picked as a minimal one since this is the first even degree, for which FPFT becomes different from a regular Fourier polynomial. By the same logic, the degree increment of 4 is the minimal increment that keeps all three polynomials different.

For each polynomial, we built an implicit surface by fitting the polynomial into the approximation point set by using conventional least square approximation. For the set of approximating points (x_i, y_i, z_i) along with signed distance to the source mesh values v_i, $i = 1..N$, the coefficients of polynomials F were obtained by the following criterion (6):

$$(F(x_i, y_i, z_i) - v_i)^2 \to \min. \tag{6}$$

Then, to validate the modeling accuracy, for each found polynomial, the root mean square error was computed in all the points of both approximation (RMSEa) and validation (RMSEv) sets. The collected data is presented in Table 1.

The same RMSEa data is also shown in Figure 6.

Surprisingly, the data shows that the Fourier polynomial of degree 19 doesn't show signs of overfitting, although its error still remains larger than for every other polynomial. The FFP doesn't show a consistent picture regarding the modeling accuracy, and the FPFT shows the signs of overfitting in degree 19, while still retaining the least error in lesser degrees.

Table 1. **Root mean square error values for Fourier polynomials**

Degree	FP		FFP		FPFT	
	RMSEa	RMSEv	RMSEa	RMSEv	RMSEa	RMSEv
7	6.10E-05	6.93E-05	2.50E-06	2.60E-06	1.78E-06	1.82E-06
11	3.73E-05	4.55E-05	3.78E-06	4.20E-06	5.08E-07	5.63E-07
15	2.43E-05	3.24E-05	7.44E-06	8.77E-06	9.63E-07	2.21E-06
19	1.62E-05	2.40E-05	3.26E-06	4.05E-06	3.71E-06	2.07E-05

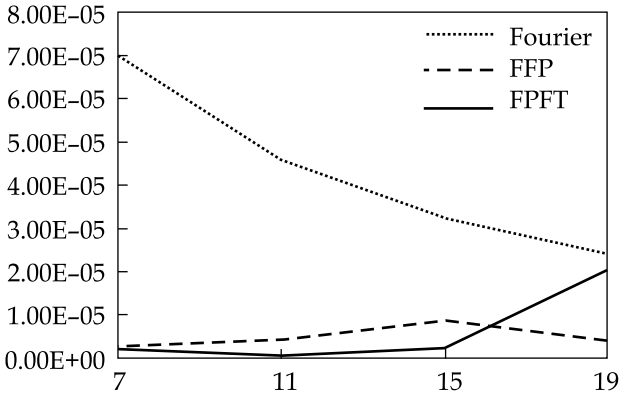


Fig. 6. RMSEa for different types of Fourier polynomials

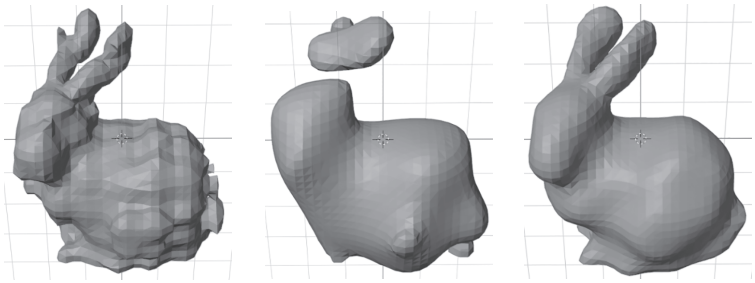


Fig. 7. Visual comparison of Fourier polynomials' modeling quality

For the visual comparison, we provide three reconstructions of implicit surfaces obtained with different polynomials of degree 15.

In Figure 7, A is the product of regular Fourier polynomial approximation, B is FFP, and C is FPFT. It's apparent that the Fourier polynomial with fractional terms is the most applicable for surface modeling among the three.

Conclusions

The quality of implicit surface modeling with a trigonometric polynomial could be enhanced drastically by introducing fractional terms into the approximating polynomial. The improvement, however, is still limited by the overfitting effect, especially on the models with highly detailed surfaces, or on non-smooth surfaces where the regularity of the underlying function isn't wanted.

The interesting practical problem to solve would be to find a way to configure the polynomial for the target model to approximate automatically. In this work, we decided to limit the polynomials to 7, 11, 15 and 19 degrees specifically so the number of integer and fractional terms would be even. But is this necessary or even desired? Perhaps this particular surface could have been better modeled with a different polynomial configuration. This question requires a separate investigation.

DECLARATION

Author contributions: *Ausheva N.M. – Supervision, Project administration; Sydorenko Yu.V. – Methodology, Writing – Review & Editing; Kaleniuk O.S. – Conceptualization, Software, Writing – Original Draft; Saiapin S.P. – Validation, Writing – Review & Editing.*

AI and Tools Usage: *The authors declare that generative AI has not been used for the creation of this paper in any capacity.*

Conflict of interest: *The authors declare that there is no conflict of interest.*

Grant or Financial Support: *The research has been conducted without a grant or financial support.*

REFERENCES

1. Wyvill G., McPheeters C., Wyvill B. Data structure for soft objects. *The Visual Computer*, 1986, Vol. 2 (4), 227–234. https://doi.org/10.1007/BF01900346
2. Ilic S., Fua P. Implicit Meshes for Surface Reconstruction. I*EEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, Vol. 28 (2), 328–333. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.37
3. Bloomenthal J., Shoemake K. Convolution surfaces. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1991, Vol. 25 (4), 251–256. https://doi.org/10.1145/127719.122757
4. Fasshauer G.E. *Meshfree Approximation Methods with MATLAB.* World Scientific Publishers, 2007, 500 p. https://doi.org/10.1142/6437
5. Wu Z. Compactly supported positive definite radial functions. *Advances in Computational Mathematics,* 1995, Vol. 4, 283–292. https://doi.org/10.1007/BF03177517
6. Ausheva N.M, Sydorenko Iu.V., Kaleniuk O.S., Kardashov O.V., Horodetskyi M.V. Implicit curves and surfaces modeling with pseudogaussian interpolation. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2025, Issue 1, 30–37, https://doi.org/10.15588/1607-3274-2025-1-3
7. Park J.J., Florence P., Straub J., Newcombe R., Lovegrove S. Deepsdf: Learning continuous signed distance functions for shape representation. *The IEEE.CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2019, 165–174. https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.05103
8. Mescheder L., Oechsle M., Niemeyer M., Nowozin S., Geiger A. Occupancy networks: Learning 3d reconstruction in function space. T*he IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2019, 4460–4470. https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.03828
9. Xueyang Zh., Xukun Sh., Yong H. MF-SDF: Neural Implicit Surface Reconstruction using Mixed Incident Illumination and Fourier Feature Optimization. *Computer Graphics Forum*, 2025, Vol. 44 (7), Article e70244. https://doi.org/10.1111/cgf.70244
10. Sun Sh., Mielle M., Lilienthal A.J., Magnusson M. 3QFP: Efficient neural implicit surface reconstruction using Tri-Quadtrees and Fourier feature Positional encoding. *ArXiv, Computer Science, Robotics*, 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.07164
11. Chun Lok Li J., Liu C., Huang B, Wong N. Learning Spatially Collaged Fourier Bases for Implicit Neural Representation. *ArXiv, Computer Science, Computer Vision and Pattern Recognition,* 2023,. https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.17018
12. Ausheva N.M., Sydorenko Iu.V., Kaleniuk O.S., Van den Ecker P., Gerashchenko O.V. Construction of 3D models for additive manufacturing based on three-periodic surfaces of the Fourier polynomial. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2026, Issue 116, 120–132. https://doi.org/10.32347/2410-2547.2026.116.120-132

Received 29.06.2026
Accepted 30.07.2026
Published 23.10.2026

Н.М. АУШЕВА, д-р техн. наук, професор,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0003-0816-2971
nataauscheva@gmail.com
Ю.В. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук, доцент,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0000-0002-1953-0410; suliko3@ukr.net
О.С. КАЛЕНЮК, канд. техн. наук, старший викладач,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
https://orcid.org/0009-0009-3141-4840; o.kaleniuk@kpi.ua
С.П. САЯПІН, канд. екон. наук, доцент,
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна
https://orcid.org/0000-0003-1565-4034; sayapin@nubip.edu.ua

ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІНОМА ФУР'Є ІЗ ДРОБНИМИ ЧЛЕНАМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ІМПЛІЦИТНИМИ ПОВЕРХНЯМИ

Імпліцитні поверхні широко застосовуються у комп'ютерному моделюванні завдяки їх властивості моделювати складні об'єкти відносно малою кількістю даних. Також важливо, що на відміну від моделей із експліцитним представленням елементів, імпліцитні поверхні не втрачають неперервності, гладкості чи регулярності при операціях деформації або реплікації. Разом із тим, експліцитні моделі, наприклад на основі трикутникової сітки, або на основі параметричного граничного представлення є золотим стандартом комп'ютерного моделювання. Для роботи з такими моделями існує безліч інструментів, бібліотек програмного коду, загальновідомих алгоритмів тощо. Питання конвертації із експліцитного представлення геометричної моделі в імпліцитне лишається питанням передового краю науки, щороку публікуються нові сучасні методики, які ґрунтуються зокрема і на досягненнях у сфері машинного навчання і штучного інтелекту.

Мета даної роботи — дослідити межі моделювання поверхні, початково заданої трикутниковою сіткою, апроксимаційним модифікованим поліномом Фур'є, який містить в собі дробні члени. Поліном Фур'є задає функцію знакової відстані, нульова ізолінія такої функції має описувати вхідну поверхню, початково задану трикутниковою сіткою, якнаймога точніше.

Методи. Основним методом дослідження є порівняльний аналіз деяких модифікацій полінома Фур'є, здійснене за допомогою обчислювальних експериментів.

Результати. Перспективи застосування полінома Фур'є без додаткових модифікацій є вельми обмеженими завдяки схильності апроксимаційного полінома до оверфітінгу, але ми показуємо, що додавання дробних членів до полінома дозволяє досягнути задовільної для певних задач точності моделювання при використанні відносно невеликої кількості коефіцієнтів полінома.

Висновки. Застосування полінома Фур'є із дробними членами дозволяє не просто моделювати замкнені геометричні об'єкти з гладкими поверхнями, а і, в перспективі, будувати поверхні спряження для інших три-періодичних поверхонь при втраті періодичності по одній з осей.

Ключові слова: *моделювання, геометричне поделювання, поліном Фур'є, апроксимація, неявне завдання поверхонь, гладкі поверхні.*

INTELLECTUAL INFORMATIONAL TECHNOLOGIES
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.016
УДК 004.048; 004.896

Р.Ю. ВАЛЬКМАН, пров. інженер,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова,40, Київ, 03187, Україна
https://orcid.org/0009-0008-5568-3503
Roman.valkman@gmail.com
О.П. ЛАГОДА, канд. техн. наук., старш. наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова,40, Київ, 03187, Україна
https://orcid.org/0009-0003-0655-6827
lagoda451@gmail.com
О.О. РОДІОНОВ, канд. техн. наук., старш. наук. співроб., завідувач відділу,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова,40, Київ, 03187, Україна
https://orcid.org/0009-0000-8304-3185
Rodionov@nas.gov.ua

АЛГОРИТМ ВОВЧОЇ ЗГРАЇ ДЛЯ ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ РОЄМ БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМ: ОГЛЯД ТА МОЖЛИВОСТІ МОДИФІКАЦІЇ

В роботі надається огляд алгоритму вовчої зграї (Wolf Pack Algorithm, WPA) та його застосування для задач керування роєм безпілотних систем (БС). Розглянуто біоінспіровані засади алгоритму вовчої зграї, основні фази його роботи й відповідні математичні моделі. Наведено формальний опис постановки задачі оптимізації, підходи до побудови цільових функцій у задачах кооперативної розвідки та оцінювання якості колективної поведінки рою. За результатами аналізу публікацій показано, що WPA і його сучасні модифікації демонструють потенціал щодо забезпечення збіжності та стійкості у високорозмірних постановках задач призначення завдань і планування траєкторій БС, однак потребують адаптації до дискретних змінних, ресурсних обмежень та вимог реального часу виконання. Окремо розглянуто приклади використання WPA в задачах кооперативної розвідки, призначення завдань рою БС і 3D-планування маршрутів; систематизовано напрями його модифікацій, зокрема елітні

Цитування: Валькман Р.Ю., Лагода О.П., Родіонов О.О. Алгоритм вовчої зграї для задач керування роєм безпілотних систем: огляд та можливості модифікації. Information Technologies and Systems, Київ, 2026, Том 4 (10), 16–42. https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.016

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

стратегії, багатопопуляційні схеми, імовірнісні пороги у фазі облоги та гібридні підходи. Додатково проаналізовано обмеження практичного застосування алгоритму вовчої зграї у зазначених задачах для реальних роїв БС, пов'язані з енергоспоживанням, обчислювальною складністю, пропускною здатністю каналів зв'язку, відмовостійкістю рою та необхідністю часткового перерозподілу завдань у динамічному середовищі. Обґрунтовано, що подальший розвиток алгоритму вовчої зграї має охоплювати ресурсно-орієнтовані модифікації, механізми часткового подієво-орієнтованого перепланування та симуляційну перевірку в робототехнічних середовищах, зокрема ROS/Gazebo, Webots, AirSim або RotorS.

***Ключові слова**: ройовий інтелект, алгоритм вовчої зграї, безпілотні літальні апарати, рій безпілотних систем, керування роєм безпілотних систем, призначення завдань, планування траєкторій, метаевристична оптимізація, відмовостійкість рою, симуляційна валідація.*

Вступ

Керування роєм безпілотних літальних апаратів є складним завданням, яке вимагає ефективних методів оптимізації в реальному часі та в умовах невизначеності [1, 2]. Централізовані підходи до призначення завдань і координації рою БС часто мають проблеми з масштабованістю, затримками обміну даними та чутливістю до відмов окремих вузлів [1, 3]. Саме тому дедалі більшого поширення набувають методи ройового інтелекту й колективного пошуку, здатні формувати (квазі)оптимальні розв'язки без потреби в повній аналітичній моделі середовища або точних градієнтів цільової функції [1, 4].

До подібних класичних біоінспірованих підходів належать:

Генетичний алгоритм (*GA*) — еволюційний метод, що імітує процеси природного добору та схрещування для поступового поліпшення покоління розв'язків. Цей підхід широко застосовується в різних галузях завдяки глобальному пошуку, проте його випадкова природа не гарантує уникнення локальних мінімумів [5].

Алгоритм оптимізації роєм частинок (*Particle Swarm Optimisation, PSO*) — популяційна метаевристика, натхненна колективною поведінкою птахів чи риб, у якій множина «частинок» коригує свої позиції, орієнтуючись на власний та колективний найкращий досвід. *PSO* привертає увагу простотою реалізації та малою кількістю параметрів для налаштування [6–8]. Завдяки внутрішній пам'яті кращих положень і обміну інформацією між частинками, він ефективно шукає екстремуми у складних ландшафтах функцій [8, 9].

Алгоритми оптимізації мурашиною колонією (*Ant Colony Optimisation, ACO*) — сімейство метаевристик, що моделюють поведінку мурах під час пошуку шляхів та побудови розв'язку через феромон-опосередковану непряму комунікацію. У класичній літературі до «мурашиних» методів належать, зокрема, *Ant System* (*AS*), *Ant Colony System* (*ACS*) та *Max–Min Ant System* (*MMAS*), які відрізняються правилами оновлення феромону й стратегіями експлуатації/дослідження [10–12]. *ACO* особливо успішний для комбінаторних задач на кшталт пошуку маршрутів (напр., задача «комівояжера») завдяки

здатності знаходити близькі до оптимуму розв'язки для *NP*-складних задач [10, 13].

Алгоритм штучної бджолиної колонії (*Artificial Bee Colony, ABC*) — підхід, що моделює пошук, оцінювання та експлуатацію «джерел їжі» бджолами, де кандидатні розв'язки відповідають агентам-«бджолам», які обмінюються інформацією про якість знайдених розв'язків. *ABC* вирізняється гнучкістю та простотою, забезпечуючи достатню точність без потреби у похідних цільової функції [14–15].

У бджоло-натхненних метаевристиках доцільно розрізняти щонайменше три окремі напрями, що усталилися в літературі:

• *Bees Algorithm* (*BA*) — пошук із поєднанням випадкової розвідки та локальної околиці перспективних розв'язків;

• *Bee Colony Optimization* (*BCO*) — конструктивний підхід із фазами «forward/backward pass» та колективним обміном інформацією [16];

• *Artificial Bee Colony* (*ABC*) — алгоритм, у якому агенти розподіляються на «*employed/onlooker/scout bees*» та балансують дослідження й експлуатацію [15].

Відповідно, термін «бджолиний рій» не є стандартною назвою окремого класу цих алгоритмів; коректніше використовувати їхні усталені назви (*BA, BCO, ABC*).

Окремо слід відзначити **алгоритм оптимізації сірих вовків (*Grey Wolf Optimizer, GWO*)**, запропонований *S. Mirjalili* та співавт. у 2014 році. *GWO* моделює ієрархію зграї (α, β, δ, ω) та етапи полювання (*encircling, hunting, attacking*), використовуючи малу кількість керуючих параметрів і не потребуючи градієнтної інформації [17]. Значний обсяг сучасних робіт з модифікаціями та прикладними застосуваннями *GWO* узагальнено в оглядах, зокрема у *Liu* та автори (2024) та *Faris* та автори (2018) [18–19].

Алгоритм вовчої зграї (*Wolf Pack Algorithm, WPA*) — відносно новий ройовий алгоритм, що моделює кооперативне полювання вовків (агентів) через фази розвідки (*wandering/scouting*), виклику (*calling*) та облоги (*besieging*), а також через правила «*winner-take*-all» для вибору лідера і «*stronger-survive*» для оновлення популяції [4, 20]. На відміну від *GWO*, де ключовим є механізм оновлення позицій відносно α/β/δ-агентів, *WPA* ґрунтується на фазовій організації пошуку та явному розподілі ролей між агентами [4, 17]. *WPA* привернув увагу дослідників завдяки гарним глобальним властивостям збіжності та стійкості до випадкових коливань [4, 21]. Він успішно застосовувався, зокрема, для задач маршрутизації та планування траєкторій **БС** [2, 22–23].

Варто підкреслити, що останні оглядові дослідження спеціально присвячені як *GWO*, так і *WPA*. Зокрема, *Liu et al*. систематизують варіанти й спектр застосувань *GWO* [18], а *Xu et al*. надають узагальнений огляд *WPA*, порівнюють його з іншими ройовими алгоритмами та окреслюють напрями подальших досліджень [4]. На відміну

від згаданих робіт загального характеру, цей огляд фокусується на перспективах застосування *WPA* (і його модифікацій) саме для задач координації рою БПЛА [1, 2, 22, 24 –26].

Спільною рисою всіх згаданих методів є початкова випадкова ініціалізація популяції кандидатних розв'язків, після чого виконується ітеративний процес їх покращення з обміном інформацією між агентами [4–5, 8, 15, 17]. Важливо, що такі алгоритми не потребують градієнтної інформації — пошук здійснюється стохастично за значеннями цільової функції. Це дає змогу ефективно оптимізувати навіть негладкі чи нерегулярні функції, а стохастична природа допомагає обходити пастки локальних мінімумів у складних багатомодальних просторах [9]. Іншими словами, ройові метаевристики розглядають задачу як «чорну скриньку» і завдяки колективній взаємодії можуть переходити до перспективних областей пошуку, уникаючи передчасної зупинки на локальних екстремумах [4, 8, 15, 17].

Однак кожен з методів має свої обмеження. Наприклад, хоча *PSO* відзначається простотою і потребує мінімум параметрів, базовий алгоритм схильний до передчасної збіжності — частинки можуть швидко зближуватися навколо субоптимального розв'язку, особливо за високої розмірності простору пошуку [8, 27]. Втрата різноманітності популяції в *PSO* призводить до застою і деградації якості розв'язку на складних задачах [6]. Генетичний алгоритм краще досліджує глобальний простір, утім теж не застрахований від стагнації: за відсутності належних механізмів підтримання різноманітності генетичний алгоритм може застрявати в локальних оптимумах [5]. Алгоритми *ACO* також можуть потерпати від ефекту стагнації: через позитивний зворотний зв'язок феромон швидко накопичується на одному маршруті, що спричиняє передчасне обрання субоптимального шляху і сповільнення збіжності. Попри різні вдосконалення (наприклад, *Ant Colony System, Max–Min Ant System*), *ACO* все ще може демонструвати повільну збіжність та застрявати в локальних мінімумах при складних умовах пошуку [10–12]. Алгоритм штучної бджолиної колонії (*Artificial Bee Colony, ABC*) має просту структуру та добре виражені можливості до глобального пошуку, проте страждає на повільну збіжність: його внутрішній механізм і рівняння пошуку забезпечують добре дослідження простору, але слабку експлуатацію знайдених розв'язку, що ускладнює досягнення глобального оптимуму [15]. Згідно з оглядовими дослідженнями, класичний *ABC* часто демонструє повільну глобальну збіжність, тому більшість удосконалень зосереджені на посиленні здатності до експлуатації без втрати різноманіття популяції [14–15]. Враховуючи зазначені недоліки, сучасні дослідження зосереджені на **вдосконаленні ройових алгоритмів** — шляхом адаптивного налаштування параметрів, гібридизації підходів та впровадження механізмів збереження різноманітності [4–5, 13–14, 18–19, 27].

У подальших розділах розглянемо базовий алгоритм *WPA*, його фази та математичні моделі, а також приклади його використання для керування роєм БПЛА.

Мета роботи

Метою роботи є проаналізувати алгоритм вовчої зграї та оцінити його потенціал для розв'язання задач керування роєм БПЛА. Для досягнення мети автори вважають за необхідне:

- описати узагальнену формалізацію задачі керування роєм БПЛА;
- подати біологічні принципи та математичну модель *WPA*;
- описати основні фази алгоритму та їх реалізацію;
- розглянути застосування *WPA* у типових задачах кооперативної роботи рою БПЛА (призначення завдань кооперативної розвідки, планування маршрутів і траєкторій, уникнення конфліктів);
- узагальнити відомі модифікації *WPA* та визначити напрями подальшого розвитку, орієнтовані на обмеження реального часу й невизначеність даних середовища/цілей.

Нижче наведено узагальнену формалізацію задачі, побудовану на основі сучасних досліджень з кооперативної розвідки, призначення завдань і планування траєкторій для рою БПЛА.

За базову постановку пропонується взяти **задачу кооперативної розвідки** (*multi-UAV cooperative reconnaissance*), у якій потрібно: **призначити** БПЛА на множину завдань/цілей (*task allocation, MRTA*), а також **побудувати маршрути/траєкторії** виконання призначених завдань з урахуванням обмежень середовища [1–3, 24, 26, 28].

Нехай рій містить M БПЛА та є N цілей/завдань. Для кожної цілі $j \in \{1, \ldots, N\}$ задані: координати p_j, ризик ураження/втрат r_j («коефіцієнт загрози»), можлива «вага/корисність» w_j, та (за потреби) часові вікна $[a_j, b_j]$. Для кожного БПЛА $i \in \{1, \ldots, M\}$ задані стартова позиція p_i^0, запас ходу/енергії R_i, швидкість та інші технічні обмеження (напр., максимальний кут набору/зниження, допустиме навантаження) [1–2, 24, 26, 28].

Змінні розв'язку в комбінованій постановці можуть бути двох типів:

— дискретні: відображення призначення σ: $\{1, \ldots, N\} \to \{1, \ldots, M\}$ та порядок виконання завдань τ_i для кожного БПЛА;

— неперервні: траєкторії $q_i(t)$ (або послідовності *waypoint*), що реалізують порядок t_i [1–3, 28]**.**

Типова **цільова функція** в кооперативній розвідці є багатокритеріальною (або зваженою сумою критеріїв), наприклад мінімізує: час завершення місії (*makespan*) $T_{\max}$; середній/сумарний час чи довжину маршрутів; інтегральний ризик/загрозу на маршрутах (через r_j та/або карти загроз) [1–2, 24, 26].

Подібні моделі (включаючи врахування загроз і часових/ресурсних обмежень) використовуються в сучасних задачах кооперативної розвідки та призначення завдань для рою БПЛА.

Обмеження середовища включають:

• повноту (кожна ціль покрита/призначена відповідно до вимог);

• ресурсні обмеження БПЛА (дальність, час, паливні/енергетичні ліміти);

• просторову безпеку (уникнення перешкод/заборонених зон);

• обмеження взаємодії між БПЛА (уникнення зіткнень, мінімальна дистанція, зв'язність мережі зв'язку) [1–2, 22, 24, 26, 28]**.**

З точки зору теорії складності, узагальнені постановки *MRTA* та пов'язані з ними задачі маршрутизації/покриття містять *NP*-складні підзадачі (зокрема варіанти задач призначення завдань рою БПЛА і маршрутизації), що мотивує застосування метаевристик у великих розмірностях та в реальному часі [1–3, 25, 28].

У подальшому огляді *WPA* розглядається як метаевристичний інструмент, здатний будувати **кандидатні розв'язки** ((σ, τ, $q(t)$) (або їхні спрощені представлення — лише σ, τ чи лише $q(t)$) та ітеративно поліпшувати їх за значенням цільової функції [4, 20, 22–26, 29–30]**.**

Цільова функція і модель рою

Алгоритм *WPA* розв'язує задачу глобальної оптимізації, метою якої є знаходження оптимального **розв'язку** у просторі допустимих розв'язків. Нехай $X_i = (x_{i1}, \ldots, x_{iD}) \in \Omega \subset \Re^D$ — вектор параметрів, який кодує кандидатний розв'язок (наприклад, параметризовану траєкторію, план призначення цілей або їх гібрид). Задано цільову функцію $f : \Omega \to \Re$, , яка відображає якість розв'язку [4, 20]. Тоді задача максимізації буде мати вигляд

$$X^* = \arg\max_{X \in \Omega} f(x),$$

де X^* — оптимальний (найкращий) вектор параметрів, який відповідає максимально можливому значенню цільової функції. (Примітка: за потреби мінімізації цільового критерію задача зводиться до максимізації шляхом зміни знаку f).* У контексті керування роєм БПЛА функція $f(X)$ може визначати ефективність колективного виконання місії — наприклад, рівень покриття території розвідкою, ймовірність виявлення цілей або інтегральний показник успішності групи БПЛА [1–2, 24, 26].

Алгоритм *WPA* ітеративно покращує розв'язок X шляхом кооперативної поведінки «зграї» агентів, прагнучи підняти значення $f(X)$ до глобального максимуму.

Для обчислення значення цільової функції $f(X)$ кожен агент алгоритму, тобто окремий кандидатний розв'язок, оцінюється відповідно до своєї поточної позиції в просторі пошуку. Значення цільової функції для такого кандидатного розв'язку ототожнюється зі «силою запаху здобичі», яку в біоінспірованій інтерпретації відчуває відповідний штучний вовк [20]. Чим більша $f(X)$, тим «ближче»

агент (вовк) до цілі. Порівнюючи значення цільової функції f для різних кандидатних розв'язків, алгоритм визначає лідера популяції, тобто агента з найкращим поточним значенням цільової функції, і спрямовує інші елементи популяції до перспективних областей пошуку [4, 20].

Основні фази алгоритму *WPA*

Алгоритм *Wolf Pack* складається з трьох основних поведінкових фаз, що моделюють колективне полювання зграї: **фаза розвідки** (*wandering/scouting*), **фаза виклику** (*calling*) та **фаза облоги** (*besieging*) [20]. У різні моменти ітеративного процесу окремі агенти відіграють роль **розвідників**, що шукають здобич, або **мисливців** (агресивних вовків), що спрямовуються до виявленої цілі на заклик лідера. Впродовж роботи алгоритму динамічно застосовуються також дві допоміжні евристики: правило **«переможець отримує все»** для вибору нового лідера та правило **виживання сильнішого** для оновлення складу зграї. Нижче наведено послідовний опис основних фаз алгоритму.

Фаза розвідки. На початку ітерації обирається декілька найбільш успішних на даний момент агентів (вовків) за значенням f у ролі **розвідників**. Агент (вовк-розвідник) самостійно досліджує околиці свого поточного положення в пошуках кращого розв'язку [20]. Якщо розвідник знаходить позицію з більшою цільовою функцією, ніж у поточного лідера зграї, він сам стає новим лідером (відбувається **зміна лідера** зграї). В іншому разі (якщо розвіднику не вдалося перевершити лідера), він виконує випадковий обхід по h напрямках навколо своєї позиції з кроком певної довжини $step_a$. Математично нове положення розвідника i при пробному русі в напрямку p описується як:

$$x_{i,d}^{(p)} = x_{i,d} + \sin\left(2\pi\frac{p}{h}\right) step_{a,d},\ p = 1, 2, \ldots, h,$$

де $x_{i,d}$ — поточна координата агенту (вовка) i по виміру d, а $step_{a,d}$ — величина кроку (радіус пошуку) для розвідувальної фази по цьому виміру. Таким чином, розвідник випробовує різні напрямки (наприклад, рівномірно розподілені по колу в $2D$-випадку) в околі свого місця. Значення h (кількість спроб/напрямків) задається випадково для кожного розвідника в межах $[h_{\min}, h_{\max}]$, що моделює різну тактику пошуку в різних агентів (вовків). Після кожного кроку обчислюється нове значення f; якщо воно перевищує поточний найкращий результат зграї f_{1lead}, цей агент (розвідник) стає лідером і фаза розвідки достроково завершується. Якщо ж жоден із випробуваних напрямків не забезпечує покращення значення цільової функції, поточний найкращий розв'язок не оновлюється, після чого алгоритм переходить до наступної фази [20].

Фаза виклику. Лідер зграї (вовк-лідер), який має найвище значення цільової функції f_{1lead}, ініціює фазу виклику. У біоінспірованій

інтерпретації ця фаза відповідає координації групового полювання, коли лідер сигналізує іншим агентам про виявлену перспективну область пошуку. Після цього група штучних вовків, тобто агентів алгоритмічної популяції, оновлює свої позиції в напрямку лідера [20]. Метою інших агентів алгоритмічної популяції є наближення до цієї точки в просторі пошуку. Кожен «вовк» i у фазі виклику оновлює своє положення за правилом:

$$x_{i,d}^{(k+1)} = x_{i,d}^{(k)} + step_{b,d} \frac{g_d^{(k)} - x_{i,d}^{(k)}}{\left| g_d^{(k)} - x_{i,d}^{(k)} \right|},$$

де $x_{i,d}^{(k)}$ — координата d-го параметра для i-того вовка на ітерації k, а $g_d^{(k)}$ — відповідна координата **лідера** (головного вовка) на цій ітерації. Вектор різниці $g^{(k)} - x_i^{(k)}$ визначає напрямок руху до лідера, а $step_b$ — крок (довжина стрибка) у фазі виклику. Таким чином, кожен «вовк» швидко просувається в бік лідера на відстань, пропорційну $step_b$. Таке оновлення позицій забезпечує швидку концентрацію популяції в околі поточного найкращого розв'язку. Якщо під час зближення якийсь «вовк» i знайде точку з вищим $f(X)$, ніж у поточного лідера, він негайно перебирає роль лідера (оновлюється f_{1ead}) і сам подає сигнал виклику. Якщо ж значення f у вовка залишається нижчим за f_{1ead}, він продовжує рух до лідера, доки відстань $L(i, 1eader)$ між ним та лідером не стане менша за визначений поріг L_{near}. Порогова відстань L_{near} задається як параметр алгоритму і визначає момент переключення до наступної фази — облоги. Таким чином, фаза виклику реалізує механізм обміну інформацією в зграї та швидкого згуртування навколо найкращого знайденого розв'язку.

Фаза облоги. Коли більшість вовків підійшли достатньо близько до лідера (цілі), алгоритм переходить у фазу облоги [20]. На цьому етапі всі агенти (окрім поточного лідера) здійснюють **оточення здобичі** та її тонке доопрацювання. Вважається, що позиція лідера в просторі — це положення здобичі (цільовий розв'язок), навколо якого проводиться локальний пошук для точного захоплення цілі. Кожен вовк i у фазі облоги оновлює свої координати за формулою:

$$x_{i,d}^{(k+1)} = x_{i,d}^{(k)} + \lambda step_{c,d} \left(G_d^{(k)} - x_{i,d}^{(k)} \right),$$

де $G^{(k)}$ — позиція здобичі (тобто поточного лідера) на ітерації k, $step_c$ — крок для облоги (значно менший за $step_b$), а λ — випадкове число в інтервалі [–1, 1] , яке задає випадкове зміщення. На відміну від фази виклику, де вовки рухались строго до лідера великими стрибками, у фазі облоги використовуються малі кроки та випадкові флуктуації напрямку (через множник l). Це забезпечує детальний пошук в околиці поточного найкращого розв'язку та допомагає стаї вийти з локального максимуму, якщо він був помилково прийнятий за глобальний. Після кожного такого мікро-руху обчислюється

нове значення цільової функції *f*. Якщо *f* збільшується (тобто $f_{new} > f_{old}$), вовк приймає нову позицію $X_i^{(k+1)}$; якщо ж покращення не досягнуто, вовк залишається на місці. Такий критерій (прийняття тільки покращень) запобігає деградації колективного розв'язку під час облоги. Процес облоги триває до завершення поточної ітерації або до виконання заданого критерію зупину (наприклад, досягнення достатньо малого приросту *f* за крок).

Примітка: Для належного налаштування алгоритму параметри кроків у різних фазах пов'язані співвідношенням: $step_a$:$step_b$:$step_c \approx$ $\approx$ 1:2:1/2. Це означає, що фаза виклику використовує найбільший крок (для швидкого зближення, грубого пошуку), фаза розвідки — крок середнього масштабу, а облога — найдрібніший крок для тонкого локального пошуку. Дотримання цього балансу забезпечує як широке охоплення простору, так і точність фінального наближення.

Оновлення популяції вовків. Окрім трьох описаних фаз, алгоритм *WPA* включає механізм підтримання різноманітності популяції, що передбачає вилучення найменш ефективних кандидатних розв'язків і генерування нових агентів замість них (так зване правило «**виживання сильніших»**) [20]. Після кількох ітерацій частина агентів може демонструвати стабільно нижчу якість кандидатних розв'язків. Такі найменш ефективні агенти, або «слабкі вовки», вилучаються з популяції, а натомість генерується така сама кількість нових агентів для збереження сталої чисельності популяції. Нові вовки ініціалізуються поблизу позиції поточного лідера, враховуючи набуту «колективну пам'ять» зграї. Зокрема, для кожного з *R* новододаних вовків *j* його координати можна задати правилом:

$$x_{j,d} = g_d + \rho_d, \;\; \rho_d \sim U(-\Delta, \Delta),$$

де g_d — координата лідера (найкращого розв'язку) по виміру *d*, а ρ_d — випадкова поправка, взята з рівномірного розподілу в інтервалі $[-\Delta, \Delta]$ (наприклад, $\Delta = 0.1\, g_d$, тобто розкид 10 % від значення). Такий механізм сприяє збереженню різноманітності популяції — нові агенти ініціалізуються в околі поточного найкращого розв'язку, але не збігаються з ним повністю, що підвищує ймовірність виявлення альтернативних якісних розв'язків. Параметр *R* (кількість одночасно замінених вовків) обирається невеликим випадковим числом (напр., від 1 до $\lfloor N/2 \rfloor$, якщо *N* — розмір зграї), аби запобігти надмірній випадковості чи, навпаки, застою в популяції. Застосування правила «виживання сильніших» після певних інтервалів ітерацій дозволяє алгоритму уникати стагнації, відкривати нові області простору та зберігати високу адаптивність.

Застосування алгоритму вовчої зграї для рою БПЛА

Алгоритм вовчої зграї (*WPA*) набув значної уваги в задачах керування роєм БПЛА завдяки своїй ефективності на складних багатовимірних проблемах [1–2, 4, 28]. Рій БПЛА діє як розподілена система фізичних апаратів, що потребує координації для досягнення спільної мети. У цьому контексті алгоритм вовчої зграї доцільно розглядати не як пряму модель поведінки окремих БПЛА, а як метаевристичний інструмент пошуку оптимальних або наближених до оптимальних рішень. *WPA* природним чином підходить для таких сценаріїв, оскільки забезпечує децентралізований, але координований пошук оптимальних розв'язків. Зокрема, Алгоритм вовчої зграї застосовувався для класу **задач кооперативної розвідки** (*multi-UAV cooperative reconnaissance*), в тому числі для підзадач **динамічного призначення завдань** у рої БПЛА та **планування траєкторій** польоту в складних умовах [22–26, 29–30].

У задачі **призначення завдань між групою БПЛА** (напрямок, відомий як *UAV task assignment*) цільовою функцією є, як правило, міра ефективності виконання низки завдань (розвідка кількох цілей, ураження цілей тощо) всіма БПЛА спільно. Ця задача є *NP*-складною і погано піддається точному розв'язанню за великої кількості БПЛА та цілей [1, 3, 28]. Тому для таких постановок активно застосовують метаевристичні підходи, зокрема *WPA* та його модифікації, які демонструють добрі властивості глобального пошуку і придатність до складних багатовимірних задач [4, 25–26, 29–30]. Наприклад, у роботі *Xu* та співавт. (2022) запропоновано мультидискретну версію алгоритму *WPA* (*MDWPA*) для призначення завдань у рої БПЛА, що враховує дискретний характер множини цілей і виконавців. Порівняно з базовим *WPA*, алгоритм *MDWPA* забезпечив вищу точність розв'язку, кращу стійкість і швидшу збіжність, успішно розв'язуючи задачу розподілу цілей у динамічному середовищі [25]. Отже, навіть у складних сценаріях застосування рою БПЛА алгоритм *WPA* та його модифікації здатні ефективно знаходити близькі до оптимальних плани розподілу цілей [24–26, 29–30].

Іншим напрямом застосування Алгоритму вовчої зграї є **планування траєкторій БПЛА** під час обльоту перешкод або проникнення в захищену зону [2, 22–23]. У таких задачах цільова функція може враховувати мінімальну довжину маршруту, мінімальний радіолокаційний ризик або поєднання подібних критеріїв [2, 22]. Класичні методи навігації часто виявляються недостатньо ефективними в складних ландшафтах цільової функції та можуть застрягати в локальних мінімумах [2, 22–23]. Застосування *WPA* дає змогу колективно досліджувати різні варіанти траєкторій і поступово покращувати маршрути БПЛА з урахуванням небезпечних зон [4, 22–23]. Дослідження показують, що покращені версії *WPA* для задач тривимір-

ного планування маршруту демонструють вищу ефективність порівняно з оригінальним алгоритмом [22–23]. Зокрема, *Chen* та співавт. запропонували модифікацію *WPA* з використанням механізму світлячків і динамічної мутації, що підвищило здатність алгоритму виходити з локальних мінімумів та прискорило збіжність. Отримані результати показали, що вдосконалений алгоритм є ефективнішим у задачі 3*D*-планування траєкторії БПЛА, забезпечуючи оптимальніші маршрути в умовах низьковисотного польоту [23]. Таким чином, *WPA* можна гнучко адаптувати до різних специфічних вимог керування роєм — від оптимального призначення цілей до безпечної та швидкої маршрутизації БПЛА [22–26, 29–30].

Варто зауважити, що багато покращень *WPA* спрямовані на подолання його внутрішніх обмежень, зокрема повільної локальної оптимізації та можливості стагнації [4, 21, 24]. Запропоновані модифікації включають, зокрема, використання елітних стратегій, імовірнісних механізмів вибору та спеціальних схем посилення пошуку, спрямованих на поліпшення збіжності й підвищення здатності алгоритму виходити з локальних оптимумів [4, 23–24]. У комплексі такі підходи дають змогу покращити глобальний пошук, не втрачаючи переваг оригінального алгоритму [4, 21, 24]. Таким чином, *WPA* залишається гнучким і перспективним інструментом для координації рою БПЛА, який може бути налаштований або розширений відповідно до специфіки завдання [4, 22–26, 29–30].

Призначення завдань рою БПЛА

Дискретні модифікації *WPA*. У задачах призначення завдань ключова складність полягає в тому, що змінні мають дискретний характер (призначення, порядок виконання, маршрути), тоді як класичний *WPA* історично розроблявся для неперервної оптимізації [4, 30]. Тому в прикладних роботах використовують дискретизацію поведінок *WPA*, зокрема через спеціальні оператори для роботи з дискретними рішеннями та перестановками. Це показано, зокрема, у роботах, де запропоновано *Multi-Discrete WPA* для задач призначення в складному середовищі й продемонстровано його переваги за точністю та стійкістю порівняно з низкою альтернатив [25].

Гібридизація *WPA* з *PSO/GA* для прискорення збіжності. Для підвищення швидкодії та якості розв'язку в дискретних постановках одним із перспективних напрямів є поєднання алгоритму вовчої зграї (***Wolf Pack Algorithm, WPA***) з механізмами інших метаевристик [4, 30]. Такий підхід особливо актуальний для призначення задач в рої БПЛА, де розв'язок має комбінаторний характер і включає дискретні відповідності між виконавцями та цілями. У роботі *Lu* та співавт. запропоновано алгоритм ***PSO-GA-DWPA***, який поєднує дискретний варіант *WPA* з принципами оптимізації роєм частинок (***Particle Swarm Optimization, PSO***) та генетичного алгоритму (***Genetic Algorithm, GA***) [30]. Ідея такої гібридизації полягає в тому, щоб

зберегти сильні сторони *WPA* як методу глобального пошуку, але водночас компенсувати його обмеження щодо швидкості збіжності та стабільності в багатовимірному просторі дискретних рішень [4, 30]. Використання елементів *PSO* дає змогу посилити спрямованість пошуку та швидше переміщувати популяцію до перспективних областей простору розв'язків, тоді як ідеї *GA* сприяють підтриманню різноманіття популяції та комбінуванню вдалих частин рішень. Це особливо важливо у великих задачах призначення завдань (***UAV task assignment***), де зі збільшенням кількості БПЛА і цілей різко зростає розмірність простору пошуку та підвищується ризик передчасної стагнації [30]. У такій гібридній схемі дискретний *WPA* вже не виступає ізольованим алгоритмом, а працює як основа для кооперативного пошуку, посиленого додатковими механізмами інтенсифікації та диверсифікації [4, 30]. За наведеними в роботі результатами, ***PSO-GA-DWPA*** демонструє високу ефективність саме для задачі призначення завдань в рої БПЛА, забезпечуючи кращу якість пошуку та швидшу збіжність порівняно з базовими підходами. Автори також підкреслюють, що така схема зберігає працездатність у складних постановках великої розмірності, де традиційні або менш адаптовані алгоритми помітно втрачають ефективність [30]. Отже, гібридизація *WPA* з *PSO* та *GA* може розглядатися як практично важливий шлях адаптації алгоритму до реальних дискретних задач координації рою БПЛА, де одночасно потрібні і якість розв'язку, і прийнятний час обчислення [4, 30].

Елітні стратегії та ймовірнісний поріг. У задачах кооперативної розвідки роя БПЛА (***multi-UAV cooperative reconnaissance***) елітні стратегії застосовують для посилення експлуатації найкращих уже знайдених схем розподілу завдань і маршрутів [24, 26]. Їхня основна ідея полягає в тому, що не вся популяція агентів впливає на подальший пошук однаковою мірою, а найкращі особини формують орієнтир для оновлення інших рішень [24]. Завдяки цьому алгоритм не лише зберігає перспективні конфігурації, а й використовує «досвід» елітної підмножини для реконструкції або корекції популяції в наступних ітераціях [24, 26]. Такий підхід підвищує інтенсивність локального пошуку в околі якісних рішень і дає змогу швидше покращувати значення цільової функції [24]. У роботах з кооперативної розвідки це особливо важливо, оскільки рішення повинні одночасно враховувати ефективність покриття цілей, ризики місії та узгодженість дій кількох БПЛА [24, 26]. Водночас надмірна орієнтація лише на поточного лідера або малу групу найкращих агентів може призводити до передчасної збіжності та втрати різноманіття популяції. Саме тому в сучасних модифікаціях *WPA* пропонується замінити класичний поріг переходу у фазі облоги (***distance threshold***) на ймовірнісний поріг (***probability threshold***). На відміну від фіксованого порогу відстані, такий механізм визначається з урахуванням різниці в пристосованості між агентами, тобто перехід до інтенсивнішої фа-

зи пошуку залежить не лише від геометричної близькості, а й від якості поточного розв'язку. Це дає змогу гнучкіше керувати балансом між дослідженням простору пошуку та експлуатацією вже знайдених перспективних областей, а також зменшує ризик застрягання алгоритму в локальних пастках [24]. Отже, поєднання елітних стратегій із ймовірнісним порогом можна розглядати як важливий напрям удосконалення *WPA* для задач кооперативної розвідки рою БПЛА, де одночасно потрібні висока якість рішень, стійкість пошуку та прийнятний час збіжності [24, 26].

Багатопопуляційні та паралельні схеми як відповідь на вимоги реального часу. Окрема проблема полягає в часі розв'язування: особливо у великомасштабних задачах призначення завдань для рою БПЛА алгоритм *WPA* може потребувати неприйнятно тривалого часу для досягнення збіжності. У роботі *Lu et al*. прямо підкреслено, що хоча *WPA* вже продемонстрував ефективність у високорозмірних дискретних задачах, для отримання найкращого розв'язку йому часто потрібно занадто багато часу, тому було запропоновано багатопопуляційний паралельний алгоритм вовчої зграї (***Multi-Population Parallel Wolf Pack Algorithm***) як спеціальну відповідь на цю проблему. Суть підходу полягає в тому, що загальну популяцію ділять на кілька невеликих підпопуляцій, які оптимізуються одночасно та незалежно, а це дає змогу зменшити обчислювальне навантаження на окрему підсистему і прискорити загальний перебіг пошуку. Водночас взаємодія між підпопуляціями не зникає: через механізми комунікації та міграції окремих рішень підтримується різноманіття популяції та запобігається передчасна збіжність. Додатково в цій схемі використовується **елітно-масовий перерозподіл** популяції, за якого найякісніші особини формують елітну підпопуляцію, а інші особини розподіляються між масовими підпопуляціями, що дозволяє двічі оптимізувати кращі рішення й тим самим пришвидшувати збіжність. Для збереження конкурентоспроможності всіх підпопуляцій автори також вводять приблизно рівномірний поділ, щоб якість стартових підгруп не була надто нерівномірною. У цій же роботі багатопопуляційний процес формалізовано у вигляді **синхронної паралельної системи**, де всі вузли виконуються одночасно, а синхронізація потрібна для регулярного обміну інформацією та підтримання стійкості системи. Результати моделювання для просторів розв'язків розмірності 8, 30 і 150 показали, що така організація є ефективною для призначення завдань рою БПЛА та може забезпечувати стабільніший і швидший вихід на якісні розв'язки [29]. Подальший розвиток цієї ідеї представлено у двоетапному багатопопуляційному *WPA*, де задача кооперативної розвідки розділяється на етап оптимізації використання ресурсів рою БПЛА та етап оптимізації плану виконання, а сама популяція поділяється на групу лідерів і дві звичайні групи, що також спрямовано на підвищення точності без надмірного зростання часу обчислення [26].

Отже, багатопопуляційні та паралельні модифікації *WPA* можна розглядати як практично важливий напрям адаптації алгоритму до реальних вимог систем рою БПЛА, у яких необхідно поєднати якість розв'язку, збереження різноманіття пошуку та прийнятний час збіжності. У задачах призначення завдань для рою БПЛА *WPA* найчастіше використовується не в початковому вигляді, а як алгоритмічна основа, доповнена дискретизацією операторів та/або гібридизацією з іншими метаевристиками.

Планування траєкторій і маршрутів рою БС (БПЛА)

У задачах планування траєкторій *WPA* зазвичай застосовується в неперервній або квазінеперервній постановці, де *X* кодує точки маршруту (*waypoints*), параметри сплайнів або керувальні впливи в дискретному часі [22–23]. Типові критерії оптимізації включають довжину маршруту, час польоту, ризик/загрозу, гладкість траєкторії та штрафи за порушення обмежень, зокрема пов'язаних із перешкодами, забороненими зонами та динамікою руху [2, 22]. Потреба у зниженні обчислювальної вартості, уникненні колізій і врахуванні обмежень середовища розглядається в оглядових роботах з планування траєкторій для групи БПЛА (*multi-UAV path planning)* як одна з ключових вимог [2].

Для задач **3*D*-планування траєкторій БПЛА** у літературі описано низку модифікацій *WPA*, спрямованих на посилення локального пошуку та підвищення стійкості алгоритму до передчасної збіжності. У роботі *Chen et al*. удосконалення базового *WPA* реалізовано не лише через загальне налаштування параметрів, а й через зміну самого механізму пошуку: автори вводять механізм наведення за аналогією зі світлячковими алгоритмами (***fluorescein guide mechanism***), що дає змогу точніше спрямовувати агентів у перспективні області простору розв'язків. Крім того, у цій роботі модифіковано режим пошуку (***search mode***) і застосовано стратегію динамічної мутації (***dynamic mutation strategy***), яка підтримує різноманіття популяції та зменшує ризик застрягання в локальних оптимумах. У результаті така модифікація забезпечує ефективніше формування тривимірних траєкторій польоту, зокрема в умовах маловисотного руху, де необхідно одночасно враховувати оптимальність маршруту та безпечне обходження перешкод [23].У ще новіших роботах запропоновано застосовувати покращений *WPA* для *multi-UAV path planning* у складних 3*D*-ландшафтах із хаотичною ініціалізацією та адаптивним кроком, що прямо позиціонується як підхід для складних середовищ і обмежень.

У новішій роботі *Zhang et al*. запропоновано вдосконалений *WPA* для **планування траєкторій роя БПЛА** в складних тривимірних ландшафтах. На етапі ініціалізації автори використовують хаотичну послідовність (*chaotic sequence*), що забезпечує більш рівно-

мірний початковий розподіл агентів у просторі пошуку та покращує охоплення області можливих розв'язків. Додатково вводиться стратегія блукання зі змінним напрямком (***variable-direction walking strategy***), яка підсилює дослідницьку здатність алгоритму, а також механізм адаптивної зміни кроку (***adaptive step-size mechanism***), що дає змогу гнучко змінювати інтенсивність пошуку на різних етапах ітерацій. Для оновлення популяції застосовано також механізм оцінювання подібності на основі відстані Геммінга (***Hamming distance–based similarity judgment mechanism***), який запобігає передчасному виродженню підтримує еволюцію різноманітних рішень. Завдяки цьому модифікований популяції та *WPA* позиціонується як придатний інструмент для складних середовищ з численними обмеженнями, де група БПЛА повинна прокладати безпечні та ефективні маршрути від стартових позицій до цілей [22].

Практична інтерпретація для рою БПЛА: алгоритм вовчої зграї (*Wolf Pack Algorithm, WPA*) та його модифікації доцільно розглядати як модуль глобальної оптимізації (*global optimization*) для побудови маршрутів і траєкторій польоту, особливо в задачах із багатьма обмеженнями, складним рельєфом та багатомодальною цільовою функцією [4, 22–23]. У такій ролі *WPA* може формувати початкові або покращені кандидатні траєкторії, які враховують довжину маршруту, ризик, часові витрати, заборонені зони та вимоги до безпеки польоту [2, 22]. Модифіковані версії алгоритму, що використовують **хаотичну ініціалізацію** (*chaotic initialization*), **адаптивну зміну кроку** (*adaptive step-size mechanism*) і **мутаційні стратегії** (*mutation strategies*), підвищують здатність алгоритму досліджувати простір розв'язків і зменшують ризик передчасної збіжності [22–23]. Це особливо важливо для тривимірного планування траєкторій у складних середовищах, де необхідно одночасно забезпечити досягнення цілі, обхід перешкод і збереження допустимих параметрів руху [2, 22–23].

У практичних архітектурах керування роєм БПЛА алгоритм вовчої зграї доцільно розглядати не як ізольований алгоритм, а як компонент гібридної системи планування. Його можна поєднувати з локальними модулями реактивного уникнення (*reactive avoidance*), які коригують маршрут у реальному часі у відповідь на раптову зміну обстановки або появу нових перешкод [2, 22]. У такій архітектурі *WPA* виконує функцію модуля глобального планування, тоді як локальні алгоритми забезпечують оперативну адаптацію траєкторії без повного перерахунку всієї місії. Подібне поєднання глобального та локального рівнів керування відповідає загальній тенденції до гібридних підходів (*hybrid approaches*) у задачах планування траєкторій групи БПЛА (*multi-UAV path planning*) [2, 4]. Отже, практична цінність алгоритму вовчої зграї полягає не лише у здатності знаходити близькі до оптимальних маршрути, а й у можливості вбудовувати його в багаторівневі системи керування роєм БПЛА як гнучкий оптимізаційний компонент [2, 4, 22–23].

Обмеження практичного застосування алгоритму вовчої зграї в роях БС (БПЛА)

Попри перспективність алгоритму вовчої зграї (*Wolf Pack Algorithm, WPA*) для задач координації рою БПЛА, його практичне застосування не може розглядатися лише з позиції якості знайденого оптимізаційного розв'язку. Для реальних безпілотних платформ критично важливими є бортові ресурсні обмеження: запас енергії, обчислювальна продуктивність бортового процесора, обсяг доступної пам'яті, пропускна здатність каналів зв'язку, затримки обміну даними, надійність зв'язності між БПЛА та обмеження сенсорного обладнання [31–33]. Саме ці фактори визначають, чи може алгоритм бути реалізований безпосередньо на борту БПЛА, чи він має виконуватися на наземній станції, на виділеному лідері рою або в гібридній *edge/cloud*-архітектурі.

Базовий алгоритм *WPA* є популяційною ітеративною метаевристикою, тому його обчислювальна складність зростає зі збільшенням кількості агентів популяції, розмірності простору пошуку та кількості ітерацій. У спрощеному вигляді обчислювальне навантаження можна оцінити як залежне від кількості вовків, кількості ітерацій, розмірності вектора рішення та вартості обчислення цільової функції. Для задач рою БПЛА величина вартості обчислення цільової функції може бути значною, оскільки одна оцінка кандидатного рішення часто включає перевірку **енергетичної допустимості маршруту, уникнення перешкод, часові вікна, конфлікти між БПЛА, ризик втрати зв'язку та обмеження безпеки польоту** [31–33]. Отже, навіть якщо самі оператори алгоритму *WPA* мають відносно просту структуру, інтегральна вартість обчислення алгоритму в реальних задачах може бути високою.

Бортова реалізація повної версії алгоритму *WPA* для великих роїв становить окрему інженерну проблему. Якщо кожен БПЛА має самостійно зберігати популяцію кандидатних розв'язків, виконувати багаторазові обчислення цільової функції та підтримувати обмін інформацією з іншими БПЛА, це може призвести до надмірного навантаження на процесор, швидкого розряду акумулятора і перевантаження каналу зв'язку [31—32]. Тому алгоритм *WPA* доцільно розглядати не як універсальний повністю бортовий алгоритм керування, а як напрямок оптимізації, який потребує архітектурної адаптації до конкретного сценарію застосування.

З практичної точки зору необхідно розрізняти обчислювальне виконання алгоритму *WPA* та фізичне виконання сформованого плану роєм БПЛА. У межах алгоритму агенти («вовки») інтерпретуються насамперед як кандидатні розв'язки оптимізаційної задачі, тобто можливі варіанти розподілу завдань, маршрутів або траєкторій, а не як прямі аналоги окремих фізичних БПЛА. Тому алгоритм *WPA* має розглядатися як програмний оптимізаційний модуль, що може

виконуватися на доступному обчислювальному ресурсі: наземній станції керування, бортовому обчислювальному модулі одного з БПЛА або у розподіленому режимі між кількома БПЛА. Результатом роботи алгоритму є план місії або його оновлена частина, що надалі реалізується роєм БПЛА з урахуванням ресурсних, енергетичних, комунікаційних і безпекових обмежень [32, 34].

Для **підвищення практичної придатності** *WPA* у задачах рою БПЛА до цільової функції необхідно явно **включати ресурсні штрафи**. Зокрема, **доцільно враховувати залишкову енергію БПЛА, очікувані витрати енергії на виконання маршруту, вартість маневрування, обсяг переданих повідомлень, ризик втрати зв'язку, обчислювальну складність локального перерахунку та запас часу до завершення завдання** [31, 33]. У такому випадку кандидатне рішення повинно оцінюватися не лише за довжиною маршруту або якістю покриття цілей, а й за реалістичністю його виконання на конкретній апаратній платформі. Це дозволяє перейти від абстрактного оптимального плану до ресурсно-допустимого плану місії.

Таким чином, **ключовим обмеженням алгоритму *WPA* для рою БПЛА є не лише можливість передчасної збіжності або повільної локальної оптимізації, а й потенційна невідповідність між обчислювальною складністю алгоритму та реальними бортовими ресурсами безпілотних платформ** [31–33]. Саме тому подальші модифікації *WPA* мають бути спрямовані на зменшення кількості ітерацій, адаптивне регулювання розміру популяції, локальний перерахунок лише змінених частин плану, обмеження обсягу інформаційного обміну між БПЛА та включення енергетичних і комунікаційних обмежень безпосередньо до математичної моделі.

Адаптація алгоритму *WPA* до динамічних умов, відмовостійкості рою БПЛА та часткового перерозподілу завдань

Іншим критичним аспектом практичного використання *WPA* є поведінка рою в динамічному середовищі. У реальних сценаріях початковий план місії рідко залишається незмінним: можуть з'являтися нові цілі, частина цілей може втратити актуальність, окремі БПЛА можуть вийти з ладу, втратити зв'язок, вичерпати енергетичний ресурс або стати непридатними до виконання конкретного завдання [32–33, 35]. Тому алгоритм керування роєм БПЛА має забезпечувати не лише первинну оптимізацію, а й живучість системи — здатність рою зберігати прийнятну ефективність після втрати окремих БПЛА або зміни умов середовища [33, 36].

У базовій формі алгоритм *WPA* не містить повного механізму відмовостійкого перерозподілу завдань у реальному часі. Зміна складу зграї агентів алгоритму у класичному варіанті пов'язана переважно з евристикою «виживання сильніших» агентів, тобто заміною слаб-

ших кандидатних рішень новими. Однак така евристика не є тотожною втраті фізичного БПЛА в реальному рої БПЛА. Якщо один або кілька БПЛА припиняють виконання місії, система має не просто оновити популяцію розв'язків, а перерозподілити невиконані завдання між доступними БПЛА з урахуванням їхнього поточного положення, залишку енергії, завантаженості, сенсорних можливостей і зв'язності [33–34, 36].

Для адаптації алгоритму *WPA* до таких умов доцільно розглядати подієво-орієнтований механізм часткового перепланування. Його суть полягає в тому, що при зміні стану системи **— втраті БПЛА, появі нової цілі, зміні пріоритету завдання або зменшенні доступного енергетичного ресурсу — не запускається повний оптимізаційний процес з нуля** [37]. Натомість формується локальна задача перепризначення лише для тієї частини плану, яка стала недопустимою або втратила ефективність. Це дозволяє зменшити час реакції системи й уникнути зайвих обчислень [35, 37].

У межах модифікованого алгоритму *WPA* такий підхід може бути реалізований через **поділ поточного плану місії на стабільну частину та множину проблемних або невиконаних завдань**. Якщо один із БПЛА втрачається, виходить із зони зв'язку або стає непридатним до виконання завдання через критичне зниження енергетичного ресурсу, завдання, призначені цьому апарату, мають бути перенесені до множини невиконаних завдань і повторно розподілені між доступними БПЛА. Наприклад, якщо БПЛА, відповідальний за обстеження двох цільових ділянок, припиняє участь у місії, алгоритм не повинен повністю перебудовувати весь план рою. Доцільніше виконати часткове перепланування: зберегти допустимі маршрути та призначення для інших БПЛА, а невиконані завдання втраченого апарата повторно призначити тим БПЛА, які мають достатній запас енергії, прийнятне просторове розташування та можливість виконати завдання без порушення часових і безпекових обмежень. Такий механізм дає змогу зменшити обчислювальні витрати порівняно з повним перезапуском оптимізаційного процесу та підвищити стійкість рою до втрати окремих БПЛА [33–34, 36–37].

Окремо слід враховувати поняття «деградації місії». У практичних умовах рій БПЛА не завжди може зберегти початкову якість виконання після втрати частини БПЛА. Тому більш реалістичною метою є не абсолютне відновлення оптимального плану, а **забезпечення контрольованої деградації: виконання найбільш пріоритетних завдань, збереження мінімально необхідного покриття території, підтримання безпечної дистанції між БПЛА та повернення БПЛА з критично низьким зарядом** [33, 36]. У такій постановці алгоритм *WPA* може бути доповнений ваговими коефіцієнтами пріоритетності завдань і штрафами за порушення критичних обмежень.

Для задач, що виконуються в динамічному середовищі, перспективним є поєднання модифікованого алгоритму *WPA* з принципом

ковзного горизонту. У такому випадку оптимізація не виконується один раз для всієї місії, а періодично повторюється для обмеженого часового або просторового інтервалу з урахуванням актуального стану рою БПЛА, залишкових ресурсів апаратів, виконаних завдань і змін у навколишньому середовищі [31]. Це дозволяє використовувати алгоритм *WPA* не для повної перебудови плану після кожної події, а для оновлення лише тієї частини розв'язку, яка стала недопустимою або менш ефективною.

Таким чином, практична адаптація алгоритму *WPA* для задач керуванням роєм БПЛА потребує поєднання первинної оптимізації плану з механізмами часткового перепланування у разі зміни умов місії. Саме **здатність оновлювати призначення та маршрути без повного перезапуску оптимізаційного процесу є важливою передумовою відмовостійкості рою**. Без урахування втрати окремих БПЛА, залишкових ресурсів, зв'язності та множини невиконаних завдань алгоритм *WPA* залишається переважно метаевристичним методом пошуку, а не завершеним рішенням для практичного керування автономним роєм БПЛА [32–33, 36–37].

Симуляційна валідація та практична цінність алгоритму вовчої зграї

Анліз наукових джерел показує, що більшість сучасних робіт щодо *WPA* та його модифікацій для рою БПЛА зосереджені на чисельному моделюванні, оцінюванні збіжності, порівнянні з іншими метаевристиками та перевірці на абстрактних або напівформалізованих постановках задач призначення завдань (*task allocation*) і планування маршрутів (*path planning*). Водночас у відкритій літературі досі бракує прикладів повної інтеграції алгоритму *WPA* у сучасні робототехнічні симуляційні середовища з урахуванням фізичної моделі БПЛА, сенсорів, каналів зв'язку, енергетичних обмежень та відмов окремих БПЛА. Саме тому симуляційна валідація має бути окремим етапом подальших досліджень [38–39].

Практична значущість алгоритму *WPA* для роїв БПЛА наразі полягає не стільки в наявності завершених промислових або експериментальних реалізацій, скільки в його потенціалі як метаевристичного інструменту для розв'язання задач розподілу завдань і планування маршрутів. Алгоритм *WPA* може бути використаний для формування початкового розподілу завдань, планування маршрутів, перерозподілу цілей між доступними БПЛА, вибору перспективних областей пошуку або побудови компромісного рішення між часом виконання місії, ризиком, енергоспоживанням та якістю покриття [31–32]. Однак для переходу від теоретичної моделі до інженерної реалізації необхідна окрема симуляційна перевірка.

Для такої перевірки доцільно використовувати робототехнічні симуляційні середовища, що підтримують моделювання багаторо-

ботних систем і багатоагентних сценаріїв за участю кількох БПЛА. Зокрема, поєднання *ROS* і *Gazebo* дає змогу відтворювати фізику руху, роботу сенсорів, обмін повідомленнями та інтеграцію алгоритмів керування у вигляді окремих програмних вузлів [40–41]. *Webots* може застосовуватися для прототипування мультиагентних сценаріїв і порівняння різних підходів до координації [42]. *AirSim* є релевантним для задач, у яких важливими є візуальна реалістичність середовища, сенсорне сприйняття та перевірка алгоритмів автономного польоту [43]. *RotorS*, як *Gazebo*-орієнтований фреймворк для моделювання мультироторних апаратів, може бути використаний для перевірки динаміки польоту та взаємодії з *ROS*-архітектурою [44]. Водночас вибір конкретного середовища моделювання має визначатися цілями експерименту, необхідною фізичною точністю, підтримкою сенсорів, масштабованістю та можливістю відтворення взаємодії між БПЛА в межах рою [38–39].

У наступній роботі доцільно реалізувати окремий симуляційний експеримент, у якому *WPA* або його модифікована версія буде протестована не лише на абстрактній цільовій функції, а й у середовищі, наближеному до робототехнічного сценарію [38–39]. Такий експеримент може включати моделювання групи БПЛА, множини цілей, обмежених енергетичних ресурсів, зон ризику, обмежень зв'язку, появи нових завдань під час місії та втрати одного або кількох БПЛА [31–33, 36]. Для оцінювання ефективності доцільно використовувати не один інтегральний критерій, а набір метрик: частку виконаних завдань, час завершення місії, сумарне енергоспоживання, кількість перепланувань, час реакції на втрату БПЛА, кількість конфліктів між БПЛА, обсяг інформаційного обміну між БПЛА та стабільність алгоритму при збільшенні розміру рою [31, 33, 37–38].

Окремим напрямом подальшої роботи має стати порівняння *WPA* з іншими підходами, зокрема *PSO, GA, ACO, CBBA*-подібними методами та гібридними алгоритмами [34]. Це дозволить визначити, у яких сценаріях *WPA* має переваги, а в яких його застосування є менш доцільним через надмірну обчислювальну вартість, повільну реакцію на динамічні зміни або складність адаптації до ресурсних обмежень БПЛА. Для інженерно-теоретичного дослідження така постановка є важливою, оскільки вона дозволяє відокремити теоретичний потенціал алгоритму від його фактичної придатності до практичного використання.

Таким чином, у межах цієї статті *WPA* розглядається як перспективний, але ще не повністю інженерно верифікований підхід до оптимізації задач рою БПЛА. Подальша реалізація, емуляція та симуляційні тести алгоритму *WPA* у середовищах *ROS/Gazebo, Webots, AirSim* або *RotorS* мають бути спрямовані на перевірку того, чи зберігає алгоритм прийнятну якість рішень за умов обмеженої енергії, обмеженого зв'язку, втрати окремих БПЛА і необхідності часткового перепланування в реальному часі [31–44].

Висновки

Алгоритм вовчої зграї (*Wolf Pack Algorithm, WPA*) зарекомендував себе як перспективний метаевристичний підхід для задач керування роєм БПЛА, оскільки він відтворює природні принципи колективного полювання та переносить їх у площину багатоагентної оптимізації [4, 20]. Його важливою перевагою є поєднання рольової організації популяції та фазової структури пошуку, у межах якої окремі агенти алгоритмічної популяції виконують функції лідера, розвідників і виконавців. Це забезпечує одночасне дослідження простору розв'язків і концентрацію пошуку в найбільш перспективних областях [4, 20]. Саме така організація дає змогу алгоритму підтримувати баланс між глобальним пошуком і локальною експлуатацією знайдених рішень, що є критично важливим для складних багатовимірних задач [4, 21]. На основі огляду наукових робіт можна зробити висновок, що на відміну від низки інших ройових і популяційних метаевристик, *WPA* демонструє прийнятні властивості збіжності, стійкість до випадкових коливань і придатність до задач великої розмірності, де класичні підходи часто втрачають ефективність [4, 21, 25]. Це особливо важливо в керуванні системами рою БПЛА, де необхідно враховувати одночасно просторові, часові, ресурсні та безпекові обмеження [1—3, 28].

Огляд наукових робіт показав, що алгоритм вовчої зграї та його модифікації застосовуються у двох ключових класах задач рою БПЛА: **призначення завдань між окремими БПЛА та планування траєкторій польоту** [22–26, 29–30]. У задачах призначення завдань рою БПЛА алгоритм адаптується до дискретної природи рішень, що дозволяє формувати плани розподілу цілей між БПЛА навіть у складних або динамічних середовищах [25, 29–30, 32]. У задачах планування траєкторій алгоритм вовчої зграї *WP*) демонструє придатність до оптимізації маршрутів у просторах зі складною геометрією, перешкодами, зонами ризику та іншими експлуатаційними обмеженнями [2, 22–23]. При цьому багатодискретні, елітні, багатопопуляційні та гібридні модифікації *WPA* спрямовані на підвищення точності, стійкості й швидкості збіжності порівняно з базовою версією алгоритму [23–26, 29–30].

Водночас проведений аналіз показує, що практична придатність *WPA* для реальних роїв БПЛА не може оцінюватися лише за якістю оптимізаційного розв'язку. Критичними залишаються **ресурсні обмеження безпілотних платформ**: енергоспоживання, обчислювальна продуктивність бортових систем, обсяг пам'яті, пропускна здатність каналів зв'язку, затримки обміну даними та необхідність багаторазового обчислення складної цільової функції [1–2, 28, 31–33]. Саме ці фактори можуть обмежувати безпосередню бортову реалізацію повної версії алгоритму вовчої зграї, особливо у великих роях або сценаріях, де потрібне швидке реагування в реальному часі.

У зв'язку з цим **алгоритм вовчої зграї** доцільно розглядати не як завершений самодостатній алгоритм автономного керування роєм БПЛА, а як перспективний метаевристичний підхід, який потребує подальшої адаптації до умов реального застосування. У задачах рою БПЛА *WPA* може використовуватися для пошуку наближених до оптимальних рішень у задачах розподілу завдань, планування маршрутів або вибору пріоритетних зон пошуку. Водночас для практичного використання такі рішення мають додатково перевірятися на відповідність ресурсним, енергетичним, комунікаційним і безпековим обмеженням конкретної безпілотної системи [2, 28, 31, 33–34]. Такий підхід дозволяє зберегти переваги метаевристичної оптимізації, але водночас уникнути надмірного узагальнення щодо готовності *WPA* до безпосереднього впровадження в реальних роях БПЛА.

Окремого значення набуває питання живучості рою в динамічному середовищі. Реальна місія може змінюватися через появу нових цілей, зміну пріоритетів, втрату зв'язку, зниження енергетичного ресурсу або вихід з ладу одного чи кількох БПЛА [31–33, 35–36]. У таких умовах початковий оптимальний план може швидко втратити актуальність. Тому перспективним **напрямом розвитку алгоритму вовчої зграї є поєднання алгоритму з механізмами часткового подієво-орієнтованого перепланування**, коли повторна оптимізація виконується не для всієї місії з нуля, а лише для тієї частини плану, яка стала недопустимою або неефективною [34, 37]. Це дозволяє зменшити обчислювальні витрати, скоротити час реакції системи та підвищити стійкість рою до втрати окремих БПЛА [33, 36–37].

Отже, результати проведеного огляду полягають не лише в узагальненні відомих модифікацій *WPA*, а й у визначенні ключових умов його практичної адаптації. Подальший розвиток алгоритму має бути спрямований на **зменшення обчислювальної складності, урахування енергетичних і комунікаційних обмежень, підтримання живучості рою та динамічний перерозподіл завдань** [31–37].

Перспективи подальших досліджень. Важливим обмеженням наявних досліджень є те, що значна частина робіт щодо *WPA* для роїв БПЛА залишається на рівні чисельного або математичного моделювання. У відкритій літературі бракує прикладів повної інтеграції алгоритму вовчої зграї у робототехнічні симуляційні середовища з урахуванням фізичної моделі БПЛА, сенсорів, каналів зв'язку, обмеженої енергії, відмов окремих БПЛА і появи нових завдань. Тому в наступній роботі планується реалізувати та промоделювати модифікований *WPA* у середовищах *ROS/Gazebo, Webots, AirSim* або *RotorS*, що дозволить перевірити його практичну придатність для інженерних систем керування роєм БПЛА, а також порівняти з альтернативними метаевристичними та гібридними підходами [31–44].

ПОВІДОМЛЕННЯ

Внесок авторів. *Р.Ю. Валькман: методологія, оригінальна чернетка, написання; О.П. Лагода: узагальнення, концептуалізація, методологія; О.О. Родіонов: основна ідея, формальний аналіз, ресурси, рецензування та редагування.*

ШІ та інші інструменти *під час написання статті не використовувалися.*

Конфлікти інтересів *відсутні.*

Гранти або фінансова підтримка *не використовувалися.*

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Wu H., Peng Q., Shi M., Xing L. A Survey of UAV Swarm Task Allocation Based on the Perspective of Coalition Formation. *International Journal of Swarm Intelligence Research (IJSIR)*, 2022, Vol. 13 (1), 1–22. https://doi.org/10.4018/IJSIR.311499
2. Rahman M., Sarkar N. I., Lutui R. A survey on multi-UAV path planning: Classification, algorithms, open research problems, and future directions. *Drones,* 2025, Vol. 9 (4), Article 263. https://doi.org/10.3390/drones9040263
3. Gerkey B.P., Matarić M.J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems. *The International Journal of Robotics Research,* 2004, Vol. 23 (9), 939–954. https://doi.org/10.1177/0278364904045564
4. Xu W., Wang Y., Xu P., Qiu T., Yan T., Wang Z. Wolf Pack Algorithm: An Overview. In: *Intelligent Robotics and Applications, ICIRA 2024,* Lecture Notes in Computer Science, Springer, Singapore, 2025, Vol. 15203, 96–110. https://doi.org/10.1007/978-981-96-0795-2_8
5. Katoch S., Chauhan S.S., Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications,* 2021, Vol. 80 (5), 8091–8126. https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6
6. Xia X., Li S. Research on improved chaotic particle optimization algorithm based on complex function. *Frontiers in Physics,* 2020, Vol. 8, Article 368. https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00368
7. Kennedy J., Eberhart R.C. Particle swarm optimization. *The IEEE Intern. Conf. on Neural Networks (ICNN'95),* Perth, Australia, 1995, 1942–1948. https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968
8. Poli R., Kennedy J., Blackwell T. Particle swarm optimization. *Swarm Intelligence,* 2007, Vol. 1, 33–57. https://doi.org/10.1007/s11721-007-0002-0
9. Chernyak Y., Mohammad I. A., Masnicak N., Pivoluska M., Plesch M. Harmonic oscillator based particle swarm optimization. *Publ. Libr. of Science One,* 2025, Vol. 20 (6), 1–26. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0326173
10. Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics,* Part B, 1996. Vol. 26 (1), 29–41. https://doi.org/10.1109/3477.484436
11. Dorigo M., Gambardella L.M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation,* 1997, Vol. 1 (1), 53–66. https://doi.org/10.1109/4235.585892
12. Stützle T., Hoos H.H. MAX–MIN ant system. *Future Generation Computer Systems*, 2000, Vol. 16, 889–914. https://doi.org/10.1016/S0167-739X(00)00043-1
13. Zhao J., You X., Duan Q., Liu S. Multiple ant colony algorithm combining community relationship network. *Arabian Journal for Science and Engineering,* 2022, Vol. 47 (8), 10531–10546. https://doi.org/10.1007/s13369-022-06579-x
14. Genghui Li, Laizhong Cui, Xianghua Fu et al. Artificial bee colony algorithm with gene recombination for numerical function optimization. *Applied Soft Computing,* 2017, Vol. 52, 146–159. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.12.017
15. Bansal J.C., Sharma H., Jadon S.S. Artificial bee colony algorithm: a survey. *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms,* 2013, Vol. 5(1/2), 123–159. https://doi.org/10.1504/IJAIP.2013.054681

16. Teodorović D. Bee colony optimization (BCO). *Innovations in Swarm Intelligence,* Studies in Computational Intelligence, Springer, 2009, Vol. 248, 39–60. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04225-6_3
17. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey Wolf optimizer. *Advances in Engineering Software,* 2014, Vol. 69, 46–61. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007
18. Liu Y., As'arry A., Hassan M. K. et al. Review of the Grey Wolf optimization algorithm: variants and applications. *Neural Computing and Applications,* 2024, Vol. 36 (6), 2713–2735. https://doi.org/10.1007/s00521-023-09202-8
19. Faris H., Aljarah I., Al-Betar M.A., Mirjalili S. Grey Wolf optimizer: a review of recent variants and applications. *Neural Computing and Applications,* 2018, Vol. 30 (2), 413–435. https://doi.org/10.1007/s00521-017-3272-5
20. Wu Hu-Sheng, Zhang Feng-Ming. Wolf Pack Algorithm for Unconstrained Global Optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, Article 465082. https://doi.org/10.1155/2014/465082
21. Chen X., Cheng F., Liu C. et al. An improved Wolf pack algorithm for optimization problems: design and evaluation. *Publ. Libr. of Science One,* 2021, Vol. 16, Article 0254239. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254239
22. Zhan Z., Na Zh., Lin Ye., Nallanathan A. Multi-UAV path planning based on an improved wolf pack algorithm in complex 3D terrains. *Chinese J. of Aeronautics,* 2025, 23p. https://doi.org/10.1016/j.cja.2025.104012
23. Chen Yu., Wu H., Xiao R. Improved Wolf Pack algorithm for UAV path planning problem. *International Journal of Swarm Intelligence Research*, 2022, Vol. 13 (1), 1–22. https://doi.org/10.4018/IJSIR.302605
24. Zhang H., Lv X., Ma C., Cui L. An Elite Wolf Pack Algorithm Based on the Probability Threshold for a Multi-UAV Cooperative Reconnaissance Mission. *Drones*, 2024, Vol. 8 (9), Article 513. https://doi.org/10.3390/drones8090513
25. Xu S., Li L., Zhou Z., Mao Y., Huang J. A Task Allocation Strategy of the UAV Swarm Based on Multi-Discrete Wolf Pack Algorithm. Applied Sciences, 2022, Vol. 12 (3), Article 1331. https://doi.org/10.3390/app12031331
26. Lv X., Xiao Zhang., Zuo L., Zhang Y., Shi B. A two-stage multi-population wolf pack algorithm for task allocation in multi-UAV cooperative reconnaissance. *The Aeronautical Journal*, 2025, Vol. 129 (1341), 3109–3141. https://doi.org/10.1017/aer.2025.10052
27. Xu Z., Xia D., Yong N., Wang J., Lin J. Hybrid particle swarm optimization for high-dimensional Latin hypercube design problem. *Appl. Sciences,* 2023, Vol. 13 (12), Article 7066. https://doi.org/10.3390/app13127066
28. Skaltsis G.M., Hyo-Sang Shin, Tsourdos A. A review of task allocation methods for UAVs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems,* 2023, Vol. 109, Article 76. https://doi.org/10.1007/s10846-023-02011-0
29. Lu Y., Ma Y., Wang J. Multi-population parallel Wolf Pack algorithm for task assignment of UAV swarm. *Applied Sciences,* 2021, Vol. 11 (24), Article 11996. https://doi.org/10.3390/app112411996
30. Lu Yi., Ma Ya., Wang J., Han L. Task assignment of UAV swarm based on Wolf Pack Algorithm. *Appl. Sciences,* 2020, Vol. 10 (23), Article 8335. https://doi.org/10.3390/app10238335
31. Han Z., Guo W. Dynamic UAV Task Allocation and Path Planning with Energy Management Using Adaptive PSO in Rolling Horizon Framework. *Appl. Sciences,* 2025, Vol. 15 (8), Article 4220. https://doi.org/10.3390/app15084220
32. Alqefari S., Menai M. E. B. Multi-UAV Task Assignment in Dynamic Environments: Current Trends and Future Directions. *Drones,* 2025, Vol. 9 (1), Article 75. https://doi.org/10.3390/drones9010075
33. Notomista G., Mayya S., Emam Y., Kroninger C., Bohannon A., Hutchinson S., Egerstedt M. A Resilient and Energy-Aware Task Allocation Framework for Heterogeneous Multi-Robot Systems. *IEEE Trans. on Robotics,* 2022, Vol. 38 (1), 159–179. https://doi.org/10.1109/TRO.2021.3093899

34. Choi H.-L., Brunet L., How J.P. Consensus-Based Decentralized Auctions for Robust Task Allocation. *IEEE Trans. on Robotics,* 2009, Vol. 25 (4), 912–926. https://doi.org/10.1109/TRO.2009.2022423
35. Ghassemi P., Chowdhury S. Multi-Robot Task Allocation in Disaster Response: Addressing Dynamic Tasks with Deadlines and Robots with Range and Payload Constraints. *Robotics and Autonomous Systems,* 2022, Vol. 147, Article 103905. https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103905
36. Mayya S., D'Antonio D. S., Saldaña D., Kumar V. Resilient Task Allocation in Heterogeneous Multi-Robot Systems. *IEEE Robotics and Automation Letters,* 2021, Vol. 6 (2), 1327–1334. https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3057559
37. Buckman N., Choi H.-L., How J. P. Partial Replanning for Decentralized Dynamic Task Allocation. *AIAA Scitech 2019 Forum,* San Diego, CA, USA, 2019, Article 0915. https://doi.org/10.2514/6.2019-0915
38. Phadke A., Medrano F. A., Sekharan C. N., Chu T. Designing UAV Swarm Experiments: A Simulator Selection and Experiment Design Process. *Sensors,* 2023, Vol. 23 (17), Article 7359. https://doi.org/10.3390/s23177359
39. Chen Z., Zhang J., Jiang W., Zhang Y., Chen Y., Chen X. A Survey on Open-Source Simulation Platforms for Multi-Copter UAV Swarms. *Robotics,* 2023, Vol. 12 (2), Article 53. https://doi.org/10.3390/robotics12020053
40. Koenig N., Howard A. Design and Use Paradigms for Gazebo, an Open-Source Multi-Robot Simulator. *The IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'2004),* Sendai, Japan, 2004, Vol. 3, 2149–2154. https://doi.org/10.1109/IROS.2004.1389727
41. Quigley M., Conley K., Gerkey B., Faust J., Foote T., Leibs J., Wheeler R., Ng A.Y. ROS: An Open-Source Robot Operating System. *ICRA Workshop on Open Source Software,* Kobe, Japan, 2009, Vol. 3, Article 1574231876066232192.
42. Michel O. Cyberbotics Ltd. Webots™: Professional Mobile Robot Simulation. *Intern. J. of Advanced Robotic System,* 2004, Vol. 1 (1), 39–42. https://doi.org/10.5772/5618
43. Shah S., Dey D., Lovett C., Kapoor A. AirSim: High-Fidelity Visual and Physical Simulation for Autonomous Vehicles. *Field and Service Robotics,* Springer, 2018, 621–635. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67361-5_40
44. Furrer F., Burri M., Achtelik M., Siegwart R. RotorS — A Modular Gazebo MAV Simulator Framework. *Robot Operating System (ROS): The Complete Reference,* Vol. 1, 2016, 595–625. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26054-9_23

Отримано/Received 05.06.2026
Прийнято/Accepted 30.07.2026
Опубліковано/Published 23.10.2026

R.Yu. VALKMAN, Leading Engineer,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
https://orcid.org/0009-0008-5568-3503
Roman.valkman@gmail.com
O.P. LAGODA, PhD (Engineering), Leading Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
https://orcid.org/0009-0003-0655-6827
lagoda451@gmail.com
O.O. RODIONOV, PhD (Engineering),
Senior Researcher, Head of Department,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
https://orcid.org/0009-0000-8304-3185
Rodionov@nas.gov.ua

WOLF PACK ALGORITHM FOR UAV SWARM CONTROL:
A REVIEV AND OPPORTUNITIES FOR MODIFICATION

Introduction. UAV swarm control is a complex problem that requires efficient real-time optimization under uncertainty, limited resources and dynamic environmental constraints. Centralized approaches to task assignment and coordination often suffer from poor scalability, communication delays and vulnerability to failures of individual nodes, which motivates the use of swarm-intelligence-based methods capable of generating near-optimal solutions without a complete analytical model of the environment. Among such methods, **the Wolf Pack Algorithm (WPA)** is a promising metaheuristic inspired by cooperative wolf hunting. It organizes the population through role differentiation and phase-based search, combining exploration and exploitation via scouting, calling and besieging behaviors.

The aim of this review is to analyze the Wolf Pack Algorithm and assess its potential for solving UAV swarm control problems. The paper summarizes the biological foundations and mathematical model of WPA, presents a generalized formulation of cooperative reconnaissance and task allocation problems for UAV swarms and describes the main phases of the algorithm together with its population update mechanism. Particular attention is given to the use of WPA in two major application areas: UAV task assignment and trajectory/path planning, including three-dimensional flight scenarios in constrained environments. The review also systematizes known improvements of WPA, including discrete adaptations, hybrid PSO/GA-based variants, elite strategies, probability-threshold mechanisms and multi-population parallel schemes designed for real-time requirements. In addition, the paper analyzes practical limitations of applying the Wolf Pack Algorithm in real UAV swarms, including energy consumption, computational complexity, communication bandwidth, swarm resilience and the need for partial task redistribution in dynamic environments.

Methods. The study is based on a literature review and theoretical analysis of the Wolf Pack Algorithm and its recent modifications. The structure of WPA is examined through its objective-function formulation, role-based population model and iterative update rules for scouting, calling and besieging phases. The paper also considers a generalized mathematical formulation of multi-UAV cooperative reconnaissance, where task assignment, route planning, risk, time, energy, communication and resource constraints are integrated into a multi-criteria optimization framework. Recent publications are analyzed to identify how WPA is adapted to discrete search spaces, how convergence is accelerated through hybridization and parallelization and how elite and probabilistic mechanisms improve search robustness in UAV swarm applications. Additional attention is paid to resource-aware adaptation, fault

tolerance, event-triggered partial replanning and simulation-based validation as necessary conditions for transferring WPA from theoretical optimization models to engineering-oriented UAV swarm systems.

Results. The review shows that WPA provides a flexible framework for solving complex UAV swarm problems in both discrete and continuous search spaces. In task-assignment scenarios, modified versions such as Multi-Discrete WPA (MDWPA) and PSO-GA-DWPA improve solution accuracy, robustness and convergence speed in large-scale combinatorial settings. In cooperative reconnaissance problems, elite strategies and probability-threshold mechanisms improve the exploitation of high-quality solutions while reducing the risk of premature convergence and local trapping. In trajectory-planning tasks, including 3D path planning in complex terrains, improved WPA variants demonstrate higher efficiency than the basic algorithm by incorporating mutation strategies, adaptive step adjustment, chaotic initialization and enhanced local-search mechanisms. At the same time, the standard WPA still has limitations, particularly slow local optimization in later iterations, the possibility of stagnation near local optima and a potential mismatch between algorithmic complexity and the limited onboard resources of UAV platforms. These shortcomings are addressed in the literature through adaptive operators, hybrid search components, multi-population parallel structures, resource-aware formulations and partial replanning mechanisms that shorten convergence time, preserve population diversity and support swarm resilience under changing mission conditions. Overall, the reviewed studies indicate that WPA and its improved variants are promising for UAV swarm control tasks requiring decentralized coordination, high-dimensional optimization, dynamic task redistribution and adaptation to uncertainty.

Conclusions. The Wolf Pack Algorithm is a promising metaheuristic approach for UAV swarm control because it combines biologically inspired collective behavior with a formal global-optimization framework. Its role-based population structure and phase-based search allow it to balance global exploration and local exploitation, which is especially valuable in large-scale, constrained, and uncertain UAV missions. The reviewed literature indicates that WPA and its modifications are applicable to two key classes of problems: task assignment and trajectory planning. Discrete, hybrid, elite and multi-population variants improve the accuracy, stability and convergence speed of the basic algorithm, making WPA a flexible platform for the development of adaptive swarm-intelligence methods in autonomous UAV systems. However, the practical applicability of the Wolf Pack Algorithm in real UAV swarms cannot be assessed only by the quality of the obtained optimization solution. Energy limitations, computational cost, communication constraints, loss of individual UAVs, and the need for partial event-triggered replanning remain critical factors for engineering implementation. Therefore, the further development of the Wolf Pack Algorithm should include resource-aware modifications, mechanisms for partial task redistribution, and simulation-based validation in robotic environments such as ROS/Gazebo, Webots, AirSim, or RotorS. Such validation is necessary to determine whether WPA-based approaches can maintain acceptable solution quality under limited energy, limited communication, UAV failures, newly emerging tasks and real-time replanning requirements.

Keywords: *Wolf Pack Algorithm; swarm intelligence; UAV swarm control; task assignment; cooperative reconnaissance; path planning; metaheuristic optimization; swarm resilience; partial replanning; simulation-based validation.*

https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.043
УДК 004.932:629.7.05

М.М. КОМАР, канд. техн. наук, старш. дослідник,
провідн. наук. співроб., заст. директора з наук. та орг. роботи.
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна
https://orcid.org/0000-0001-9194-2850
nickkomar08@gmail.com
В.М. СІМАХІН, д-р філос. (комп'ютерн. науки), в.о. зав. лаб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна
https://orcid.org/0000-0003-4497-0925
thevladsima@gmail.com
І.В. ПОПОВ, аспірант, наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна
https://orcid.org/0009-0009-7961-9431
popigor7@gmail.com

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОФЛАЙН ОБРОБЛЕННЯ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ЗОБРАЖЕНЬ З БОРТОВОЇ КАМЕРИ

У статті розв'язано актуальне науково-практичне завдання з підвищення точності та надійності відновлення траєкторії польоту літальних апаратів (ЛА) за даними бортового відеознімання в умовах складного рельєфу та завад. Обґрунтовано та реалізовано концепцію візуально-аналітичного відтворення польотної інформації у формі стаціонарного програмно-апаратного комплексу офлайн-оброблення даних. Запропоновано синтезований метод, який базується на конвеєрному поєднанні трьох алгоритмічних компонентів: алгоритму аналізу та селекції кадрів для автоматичного вилучення сотворених зображень, методу топографічної кластеризації послідовностей зображень на основі концепції топографічної спорідненості, а також методу крос-кореляційної кластеризації віртуальних особливих точок. Останній забезпечує суміщення кадрів за відсутності природних маркерів над текстурно однорідними ландшафтами завдяки використанню шаблонів піксельної кореляції та геометричного зіставлення трикутних конфігурацій за кутами нахилу й співвідношенням довжин векторів. Побудовано математичну модель визначення вектора зсуву зображення для розрахунку реальної подола-

Цитування: Комар М.М., Сімахін В.М., Попов І.В. Аналіз методів та засобів офлайн оброблення послідовностей зображень з бортової камери. *Information Technologies and Systems*, Київ, 2026, Том 4 (10), 43–53. https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.043

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

ної відстані та просторово-часової динаміки руху (зсув, поворот, масштаб, висота). Забезпечено автоматичне формування структурованих наборів даних (форматів CSV та JSON) для застосування в оборонній аналітиці, розвідці, наукових дослідженнях та оцінці дій операторів ЛА.

***Ключові слова**: послідовності зображень, офлайн-оброблення зображень, комп'ютерний зір, топографічна кластеризація, віртуальні особливі точки, крос-кореляційний аналіз, реконструкція траєкторії.*

Вступ

В умовах інтенсивного використання різноманітних літальних апаратів (ЛА) виникає потреба не лише у реалізації алгоритмів автономної навігації в реальному часі, але й у проведенні глибокого післяпольотного аналізу отриманих візуальних даних в режимі офлайн.

На відміну від систем реального часу, які обмежені в обчислювальних ресурсах бортових комп'ютерів та вимогами до мінімальної затримки, офлайн-оброблення має кардинально інші цілі та можливості. Відбувається зміна базових завдань, і метою стає не оперативне виявлення перешкод чи коригування курсу, а високоточна реконструкція траєкторій польоту, створення ортофотопланів, формування якісних датасетів для навчання нейромереж, а також аналітика та детальний аудит дій оператора.

Обчислення здійснюється на стаціонарних програмно-апаратних комплексах без обмежень щодо енергоспоживання та обчислювальної потужності. Це дозволяє застосовувати складні математичні моделі та ресурсоємні алгоритми комп'ютерного зору до малих обсягів вибіркових або суттєво спотворених даних, отримуючи з них максимум корисного сигналу.

Зображення з бортових камер зазнають специфічних деформацій, як то: високого рівня шуму через низьку освітленість або вібрації носія, оптичних спотворень, різких перспективних зсувів, змазування кадрів при маневрах, а також відсутності чітких текстових або контрастних деталей під час польотів над однорідними ландшафтами (лісові масиви, водойми, снігові покриви чи рівнини). Усунення цих спотворень та відновлення просторово-часової динаміки польоту вимагає розроблення спеціалізованих методологічних підходів до вибіркового та синтетичного аналізу відеопотоку.

Метою статті є аналіз наявних методів та засобів комп'ютерного зору і обґрунтування на їх основі синтезованого методу офлайн-оброблення послідовностей зображень з бортової камери ЛА для автоматизованого відбору якісних кадрів, зіставлення зображень над текстурно однорідними ландшафтами та високоточного відтворення траєкторії польоту.

Огляд літератури

Аналіз сучасних науково-технічних джерел свідчить про стрімкий розвиток методів і засобів комп'ютерного зору для оброблення візуальних даних, отриманих з літальних апаратів [1–3]. Залежно від умов засто-

сування розрізняють системи реального часу, включно з алгоритмами візуальної одометрії та методами одночасної локалізації й побудови карти (*Simultaneous Localization and Mapping, SLAM*) [1–2], та комплекси післяпольотного офлайн-аналізу [4–5].

Серед наявних методів оброблення та зіставлення зображень фундаментальне значення мають алгоритми виявлення та опису особливих точок. Найбільш відомими є класичні детектори, такі як алгоритм масштабоінваріантного перетворення ознак (*Scale-Invariant Feature Transform, SIFT*) [6] та алгоритм прискорених стійких ознак (*Speeded-Up Robust Features, SURF*) [7]. Вони забезпечують високу інваріантність до зміни масштабу, повороту та нерівномірних змін освітленості. Для систем із обмеженими обчислювальними ресурсами широко використовується алгоритм *ORB* (*Oriented FAST and Rotated BRIEF*) [8], що базується на бінарних дескрипторах і працює значно швидше за *SIFT* [6] чи *SURF* [7]. Також для оцінювання міжкадрових переміщень застосовуються диференціальні методи оптичного потоку, зокрема класичний метод Люкаса-Канаде [9].

Проте наведені методи мають низку обмежень. За умов зниження якості вхідного відеопотоку під час польотів ЛА кількість стабільних особливих точок суттєво зменшується [4, 10]. Іншою проблемою є оброблення даних над текстурно однорідними поверхнями (зокрема лісовими масивами, водоймами, степовими ділянками), де класичні алгоритми трекінгу [6–7] зазнають збоїв через відсутність чітких природних маркерів.

Серед засобів оброблення та програмно-апаратних рішень сучасні дослідження охоплюють широкий спектр інструментів — від відносно легких бібліотек комп'ютерного зору до фотограмметричних платформ [3, 5]. Ресурсоємні фотограмметричні комплекси (наприклад, *Pix4D, Agisoft Metashape*) реалізують методи реконструкції тривимірних сцен на основі підходів «структура з руху» (*Structure-from-Motion, SfM*) та багаторакурсного стереооброблення [3, 10]. Водночас такі засоби є чутливими до наявності пропущених або низькоякісних кадрів у послідовності: поява змазаного чи зашумленого кадру часто призводить до розриву траєкторії або суттєвого спотворення всієї геометричної моделі [4, 10].

Таким чином, наявні методи [6–9] та засоби [3, 5] є орієнтованими або на роботу в реальному часі з обмеженою точністю [1–2], або на ідеальні вхідні фотограмметричні дані високої якості [3, 10]. Для умов, коли відеозаписи з бортової камери ЛА містять фрагментарні спотворення, шуми та ділянки з відсутністю характерних фрагментів, виникає потреба у формуванні обґрунтованої послідовності спеціалізованих алгоритмів, об'єднаних в єдиний комплексний метод селекції та аналізу кадрів.

Синтез методу аналізу та селекції кадрів з бортової камери ЛА

Для усунення обмежень класичних підходів та оброблення низькоякісних або слабоструктурованих візуальних даних запропоновано синтезований метод аналізу та селекції кадрів з бортової камери ЛА. В основу методу покладено концепцію поєднання трьох спеціалізованих алгоритмічних компонентів, кожен з яких виконує окрему функцію в загальному контурі офлайн-оброблення.

Першим компонентом є алгоритм відбору якісних зображень, призначений для первинного фільтрування вхідного масиву кадрів. У процесі польоту ЛА значна частина відеопотоку спотворюється через розмиття внаслідок руху, вібрації носія та різких змін освітленості. Запропонований алгоритм оцінює рівень чіткості та міжкадрового перекриття, що дає змогу вилучати неінформативні кадри. Це підвищує підсумкову точність реконструкції та зменшує обчислювальні витрати на наступних етапах.

Для автоматизованої селекції зображень низької якості запропоновано метод оцінювання локального контрасту на основі аналізу розсіювання інтенсивності пікселів. Оцінювання здійснюється у локальних вікнах розміром 9×9 пікселів, рівномірно розподілених площею кадру (для роздільної здатності 1920×1080 кількість таких ділянок становить $m = 40000$).

Для кожного k-го вікна з кількістю пікселів n обчислюється середнє значення інтенсивності сірого кольору $\overline{I}_k$ та дисперсія σ_k^2:

$$\overline{I}_k = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I_i,\ \sigma_k^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(I_i - \overline{I})^2,$$

де I_i — інтенсивність i-го пікселя.

Локальний контраст вікна визначається як середнє квадратичне (стандартне) відхилення $\sigma_k = \sqrt{\sigma_k^2}$, що має однакову розмірність із вихідною інтенсивністю. Підсумковий показник якості кадру визначається як середнє значення стандартного відхилення по всьому зображенню:

$$\overline{I}_k = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I_i,\ \sigma_k^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(I_i - \overline{I})^2.$$

Високе значення $\bar{\sigma}$ свідчить про високу чіткість, наявність виражених контурів і текстурних особливостей, тоді як низьке значенні $\bar{\sigma}$ ідентифікує розмиті, змазані або однотонні кадри, які підлягають автоматичному вилученню з подальшого оброблення.

Другим компонентом є метод зіставлення послідовностей зображень, розроблений на основі принципів топографічної кластеризації. Запропонований підхід призначений для підвищення надійності геометричного аналізу візуальних даних за рахунок концепції топографічної спорідненості кадрів. На відміну від стандартного точко-

вого зіставлення, топографічна кластеризація розглядає взаємне просторове положення кадрів як елементів цілісної топологічної структури. Це дозволяє надійно оцінювати параметри просторового руху ЛА (вектори зсуву, кути повороту та масштабні коефіцієнти) навіть за наявності суттєвих спотворень перспективи.

Метод забезпечує обчислення просторового переміщення, зміни висоти польоту та курсового кута ЛА між базовим і поточним кадрами.

На першому та другому етапах здійснюється виявлення особливих областей за допомогою детектора локальних максимумів оператора Лапласа, після чого проводиться їхня двофакторна фільтрація за діаметром і розміром просторового вікна. На третьому етапі виконується перебір комбінацій з трьох особливих зон для формування трикутників $A_1B_1C_1$ та $A_2B_2C_2$, де центр мас $C(C_x, C_y)$ кожного трикутника обчислюється за координатами його вершин:

$$C_x = \frac{a_x + b_x + c_x}{3}, C_y = \frac{a_y + b_y + c_y}{3}.$$

Для векторів a, b, c спрямованих від центра мас C до точок a, b, c розраховуються їхні довжини та кути відносно опорного вертикального перпендикуляра h. Кут α у радіанах обчислюється як:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{h \cdot a}{\|h\|\,\|a\|}\right).$$

Для точок, що лежать ліворуч від центра мас, кут коригується для забезпечення діапазону $[0^o, 360^o]$:

$$\alpha_{full} = 2\pi - \alpha.$$

Подібність трикутників встановлюється за двома критеріями:

• кутова відповідність: різниці кутів $\Delta\alpha_i = \alpha_{2,i} - \alpha_{1,i}$ для відповідних векторів повинні бути приблизно однаковими та не перевищувати порогове значення:

$$\left|\Delta\alpha_a - \Delta\alpha_b\right| \le \varepsilon_\alpha, \left|\Delta\alpha_b - \Delta\alpha_c\right| \le \varepsilon_\alpha,$$

• масштабна відповідність: відношення довжин векторів $R_{V,i} = \frac{L_{2,i}}{L_{1,i}}$ (де $i \in \{a, b, c\}$), перевіряються на відхилення від середнього:

$$\Delta R_V = \left|R_{V,i} - R_{V,j}\right| \le \varepsilon_R.$$

На четвертому етапі конфігурація верифікується додаванням четвертої особливої зони d, утворюючи чотирикутник із центром мас $C'(C'_x, C'_y)$:

$$C'_x = \frac{a_x + b_x + c_x + d_x}{4}, C'_y = \frac{a_y + b_y + c_y + d_y}{4}.$$

На п'ятому етапі розраховуються підсумкові параметри руху:

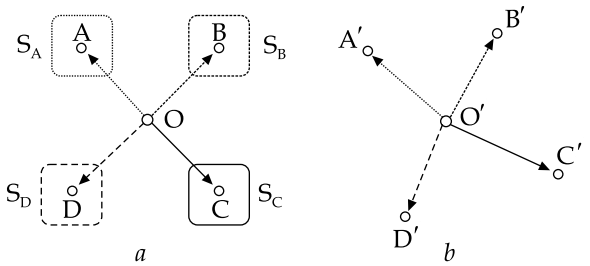


Рис. 1. Схема процесу формування векторів зіставлених віртуальних точок еталонного (*a*) і поточного (*b*) зображень

Кут повороту (Δθ): середнє значення кутових різниць $\Delta\theta = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4}\Delta\alpha_i$.

Зміна висоти: визначається через середня значення масштабу $\Delta R_V = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4} R_{V,i}$, де зміна висоти є обернено пропорційною до R_V.

Вектор зсуву (A_s): побудований на поточному кадрі вектор A_2 (від C_2' до центра кадру C_{z2}) повертається на кут $-\Delta\theta$ за допомогою матриці повороту:

$$\begin{pmatrix} A_{tx} \\ A_{ty} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-\Delta\theta) & -\sin(-\Delta\theta) \\ \sin(-\Delta\theta) & \cos(-\Delta\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{2x} \\ A_{2y} \end{pmatrix}.$$

Після масштабування $A_{mt,x} = \frac{A_{tx}}{R_V}$, $A_{mt,y} = \frac{A_{ty}}{R_V}$ та перенесення точки на базовий кадр $A_{Ax} = C_{1x}' + A_{mt,x}$, $A_{Ay} = C_{1x}' + A_{mt,y}$, вектор зсуву A_s утворюється між центром базового кадру C_{z1} та точкою A_A:

$$A_s = (A_{Ax} - C_{Z1,x}\ A_{Ay} - C_{Z1,y}).$$

Модуль вектора зсуву $L_s = \|A_c\| = \sqrt{(A_{Ax} - C_{Z1,x})^2 + (A_{Ay} - C_{Z1,y})^2}$ визначає підсумкову відстань, подолану ЛА між кадрами в координатах зображення.

Третьою складовою є метод кроскореляційної кластеризації віртуальних особливих точок. Необхідність його застосування обумовлена суттєвим зниженням ефективності класичних підходів на однорідних ділянках місцевості (водні поверхні, щільні лісові масиви, снігові покриви, сільськогосподарські поля тощо), де практично відсутні чітко виражені природні контрастні маркери.

Запропонований метод формує сітку віртуальних особливих точок на основі шаблонів піксельної кореляції та здійснює геометричне зіставлення їх трикутних конфігурацій з урахуванням кутів нахилу й співвідношення довжин векторів. Це дає змогу надійно розв'язувати задачі візуальної одометрії та геопросторового аналізу навіть за умов повної відсутності характерних фрагментів рельєфу.

Процес формування векторів зіставлених віртуальних точок еталонного та поточного зображень показано на рис. 1. На початку процесу на еталонному кадрі задають віртуальні точки *A*, *B*, *C*, *D* та від-

повідні шаблони пошуку S_A, S_B, S_C, S_D. За допомогою двовимірної кроскореляції всередині поточного зображення знаходять координати центрів цих шаблонів, які утворюють відповідні віртуальні точки поточного кадру A', B', C', D'. Далі обчислюють центри мас для віртуальних точок еталонного (O) та поточного (O') зображень. Зіставлені віртуальні точки спільно з центрами мас визначають конфігурацію зірок кластеризації з векторами променів OA, OB, OC, OD для еталонного кадру та $O'A'$, $O'B'$, $O'C'$, $O'D'$ для поточного.

Синтез описаних алгоритмів у єдиний метод аналізу та селекції послідовностей зображень реалізовано як триетапний обчислювальний конвеєр. На першому етапі вхідний відеопотік проходить автоматичну селекцію для формування оптимізованого масиву інформативних кадрів. На другому етапі до сформованої вибірки застосовується метод топографічної кластеризації, а в разі виявлення текстурно однорідних ділянок додатково задіюється кроскореляційний аналіз віртуальних особливих точок. На завершальному етапі отримані геометричні параметри та вектори зсуву інтегруються в єдину математичну модель, що забезпечує відновлення траєкторії польоту ЛА у просторі координат та формування структурованих результуючих датасетів.

Математична реалізація об'єднаної моделі розпочинається з адаптивного формування множини опорних точок $\mathrm{P} = \{p_i\}_{i=1}^{M}$. На текстурованих ділянках місцевості точки виявляються як максимуми оператора Лапласа:

$$p_i = \arg\max_x \left|\Delta I_1(x)\right|.$$

На однорідних поверхнях за дефіциту природних контрастів на базовому кадрі задаються піксельні шаблони S_i, а відповідні їм віртуальні точки $p_{2,i}$ на поточному кадрі знаходять шляхом максимізації нормованої взаємної кореляції:

$$p_{2,i} = \arg\max_x NCC(I_2(x), S_i).$$

Отримані чотири зіставлені точки використовуються для побудови геометричних зірок кластеризації. Спочатку обчислюються координати центрів мас O_1 та O_2 для базового і поточного кадрів:

$$O_k = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} p_{k,i},\ k \in \{1,2\}.$$

Далі формуються вектори променів $v_{k,i} = p_{k,i} - O_k$, для яких визначаються їхні довжини $L_{k,i} = \left\|v_{k,i}\right\|$ та кути $a_{k,i}$ Î [0°, 360°] відносно опорної вертикальної осі.

На завершальному етапі проводиться розрахунок параметрів руху ЛА та просторового зсуву зображень. Кут повороту відносно курсу оцінюється як середнє значення кутових різниць відповідних променів:

$$\Delta\theta = \frac{1}{M}(\alpha_{2,i} - \alpha_{1,i}).$$

Зміна висоти польоту ЛА є обернено пропорційною до середнього масштабного коефіцієнта R_V:

$$R_V = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\frac{L_{2,i}}{L_{1,i}}.$$

Для визначення пройденої відстані вектор $A_2 = C_{Z2} - O_2$, побудований від центра мас до центра поточного кадру C_{Z2}, повертається на кут $-\Delta\theta$ за допомогою матриці повороту R та масштабується коефіцієнтом $1/R_V$:

$$A_{mt} = \frac{1}{R_V}R(-\Delta\theta)A_2.$$

Після перенесення отриманого вектора на базовий кадр відносно його центра мас $A_A = O_1 - A_{mt}$, підсумковий вектор зсуву зображення визначається відносно центра базового кадру C_{Z1}:

$$A_A = A_A - C_{Z1}.$$

Його модуль задає пройдену відстань між кадрами в піксельному просторі:

$$L_s = \|A_S\| = \sqrt{(A_{Ax} - C_{Z1,x})^2 + (A_{Ay} - C_{Z1,y})^2}.$$

Запропонований синтезований метод дає змогу вирішити ключову задачу офлайн-оброблення відеопотоку бортової камери — автоматично відсіювати некоректні кадри та формувати структуровані просторово-прив'язані датасети у форматах *CSV* та *JSON* для подальшого аналізу.

Обговорення результатів

Запропонований синтезований метод демонструє високу стійкість до специфічних завад бортової відеофіксації, таких як високочастотні вібрації, різкі зміни освітленості та локальні геометричні спотворення. Основна перевага розробленого підходу полягає в здатності надійно відновлювати траєкторію польоту за умов, коли класичні фотограмметричні підходи (зокрема алгоритми на основі *SIFT*, *SURF* або *ORB*) втрачають працездатність через дефіцит або деградацію трекінгу натуральних еталонних точок.

Завдяки впровадженню концепції віртуальних особливих точок і кроскореляційної кластеризації досягнуто стабільності обробки послідовностей кадрів над текстурно однорідними ландшафтами (водні поверхні, сніговий покрив, сільськогосподарські поля, щільні лісові масиви тощо). Порівняно з наявними рішеннями візуальної одометрії, геометрична фільтрація трикутних конфігурацій за кутами нахилу та співвідношенням довжин векторів забезпечує високу стійкість до перспективних спотворень без необхідності виконання складних ітераційних процедур на кожному кадрі.

Впровадження модуля попередньої селекції дає змогу скоротити загальні обчислювальні витрати на 30–40% за рахунок автоматичного вилучення кадрів із динамічним розмиттям та недостатнім міжкадровим перекриттям. Це оптимізує роботу офлайн-конвеєра без втрати точнісних характеристик підсумкової 3*D*-реконструкції траєкторії.

Формування структурованих вихідних датасетів у форматах *CSV* та *JSON* забезпечує повну сумісність отриманих даних із зовнішнім програмним забезпеченням. Це спрощує кросплатформну інтеграцію розробленого комплексу з наявними геоінформаційними системами, аналітичними платформами післяпольотного контролю та тренажерними комплексами підготовки операторів ЛА.

Висновки

Як результат проведеного дослідження розв'язано актуальне науково-практичне завдання з підвищення точності та надійності відновлення траєкторії польоту ЛА за даними бортового відеознімання в умовах складного рельєфу та завад. На відміну від систем автономної навігації реального часу, розроблену технологію реалізовано як стаціонарний програмно-апаратний комплекс. Вона працює з ідентичним відеопотоком бортових оптичних систем ЛА, проте здійснює його оброблення в режимі офлайн, що дає змогу застосовувати ресурсоємні методи комп'ютерного зору та складні математичні моделі, які забезпечують підвищену точність аналізу й деталізацію реконструкції траєкторій.

Наукова концепція розробки базується на принципі візуально-аналітичного відтворення польотної інформації. В її основу покладено метод топографічної кластеризації послідовностей зображень для виявлення характерних ознак місцевості, метод кроскореляційної кластеризації віртуальних особливих точок для суміщення кадрів за відсутності чітких природних маркерів над однорідними ландшафтами, а також метод аналізу та селекції кадрів для автоматичного вилучення неінформативних або спотворених зображень. Інтеграція цих методів дала змогу сформувати універсальну технологію, яка забезпечує автоматичне розпізнавання й зіставлення кадрів бортового відеозапису, оцінювання взаємного зсуву, масштабу, повороту й висоти, а також відновлення траєкторії польоту в тривимірному просторі координат. Результати обчислень та метадані експортуються у структуровані датасети форматів *CSV* та *JSON* для подальшої аналітики або навчання.

Розроблений аналітичний комплекс не втручається в процес керування ЛА, а здійснює поглиблену післяпольотну обробку даних. Це забезпечує отримання вичерпної інформації про просторово-часову динаміку польоту та створює підґрунтя для застосування технології в оборонній аналітиці, розвідці, оцінці дій операторів та науково-технічних дослідженнях.

У результаті проведених теоретичних і прикладних досліджень обґрунтовано концепцію топографічної спорідненості зображень

для обчислення параметрів просторового руху. Розроблено алгоритм геометричного зіставлення трикутних конфігурацій особливих областей із використанням кутів нахилу та співвідношення довжин векторів, що забезпечує стійкість до спотворень перспективи. Побудовано математичну модель визначення вектора зсуву зображення між базовим і поточним кадрами для обчислення реальної подоланої відстані. Створено модель формування віртуальних особливих точок на основі шаблонів піксельної кореляції за умов текстурної однорідності ландшафту, а також реалізовано прототип інформаційної технології, здатної аналізувати великі обсяги візуальних даних із високою точністю та стійкістю до завад.

ПОВІДОМЛЕННЯ

Внесок авторів. *М.М. Комар сформулював наукові концепції, написання розділу «Вступ», розробив теоретичні основи топографічної спорідненості зображень та математичних моделей. В.М. Сімахін виконав синтез узагальненого методу аналізу і селекції послідовностей зображень (розділ «Синтез методу аналізу й селекції кадрів з бортової камери ЛА»). Адаптував алгоритми геометричного співставлення та структурування даних. І.В. Попов провів аналіз науково-технічної літератури (розділ «Огляд літератури»), а також систематизацію та порівняльний аналіз існуючих засобів комп'ютерного зору.*

Конфлікт інтересів. *Автори заявляють про відсутність у них відомих конкуруючих фінансових інтересів чи особистих зв'язків, які могли б вплинути на роботу, представлену в цій статті.*

Застосування ШІ. *Автори заявляють що не застосовували ШІ під час підготовки статті, окрім простої корекції мови, редагування та форматування.*

Фінансування. *Це дослідження виконано за грантової підтримки Національного фонду досліджень України у межах проєкту за реєстраційним номером 2025.06/0066 у конкурсі «Наука для зміцнення обороноздатності та національної безпеки України».*

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual odometry: Part I — The first 30 years and the basics. *IEEE Robotics and Automation Magazine,* 2011, Vol. 18 (4), 80–92. https://doi.org/10.1109/MRA.2011.943233
2. Cadena C., Carlone L., Carrillo H., Latif Ya., Scaramuzza D., Neira J., et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust perception age . *IEEE Transactions on Robotics,* 2016, Vol. 32 (6_, 1309–1332. https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2624754
3. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications.* Springer, 2022, 2nd ed., 1162 p.
4. Huang X, Wan X, Peng D. Robust Feature Matching with Spatial Smoothness Constraints. *Remote Sensing,* 2020, Vol. 12 (19), Article 3158. https://doi.org/10.3390/rs12193158
5. Torres-Sánchez J., López-Granados F., De Castro A.I., Peña-Barragán J.M. Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (UAV) for early site specific weed management. *PLoS ONE,* 2013, Vol. 8 (3), Article e58210. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058210
6. Lowe D. G. Distinctive image features from scale invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision,* 2004, Vol. 60 (2), 91–110. https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94
7. Speeded up robust features (SURF) / H. Bay et al. *Computer Vision and Image Understanding,* 2008, Vol. 110 (3), 346–359. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014
8. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. *2011 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV),* Barcelona, Spain, 2011, 2564–2571. https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544

9. Lucas B.D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence,* Vancouver, Canada, 1981, Vol. 2, 674–679.
10. Hartley R., Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2004, 655 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511811685

Отримано/Received 21.06.2026
Прийнято/Accepted 04.09.2026
Опубліковано/Published 23.10.2026

M.M. KOMAR, PhD (Engineering), Senior Researcher,
Deputy Director for Scientific and Organizational Work,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-9194-2850
nickkomar08@gmail.com
V.M. SIMAKHIN, PhD (Computer Sciences), Acting Head of the Research Laboratory,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-4497-0925
thevladsima@gmail.com
I.V. POPOV, PhD Student, Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
https://orcid.org/0009-0009-7961-9431,
popigor7@gmail.com

ANALYSIS OF METHODS AND MEANS FOR OFFLINE
PROCESSING OF AIRBORNE CAMERA IMAGE SEQUENCES

Introduction. The paper addresses the relevant scientific and practical problem of improving the accuracy and reliability of aircraft flight trajectory reconstruction based on onboard video recording under conditions of complex terrain and visual interference. Onboard optical navigation systems operating in real time face significant limitations when processing blurred images or textureless landscapes, necessitating the development of advanced offline visual data processing systems.

The purpose of the paper is to analyze existing computer vision methods and tools, and based on this analysis, to substantiate a synthesized method for offline processing of airborne aircraft image sequences to enable automated selection of high-quality frames, reliable image matching over textureless landscapes, and high-precision flight trajectory reconstruction.

Results. Conceptually structured as an offline stationary software and hardware complex, the developed technology implements a visual-analytical flight data reconstruction concept consisting of three pipelined components: automatic selection to eliminate degraded frames, topographic clustering based on image affinity, and cross-correlation clustering of virtual keypoints for markerless regions (e.g., bodies of water, dense forests). The mathematical models incorporate pixel correlation templates, geometric matching of triangular configurations using tilt angles and vector length ratios, and shift vector calculations for robust spatial dynamic evaluation (translation, rotation, scale, and altitude). Computation metadata and spatial-temporal dynamics are automatically exported into structured CSV and JSON datasets.

Conclusions. The proposed approach provides high-precision trajectory reconstruction and spatial dynamic analysis without interfering with aircraft flight control systems. Eliminating corrupted frames and utilizing virtual keypoints guarantees stable processing across homogenous terrains and reduces computational load. The created analytical complex creates a reliable technological foundation for applications in defense analytics, reconnaissance, scientific research, and aircraft operator training assessment.

Keywords: *image sequences, offline image processing, computer vision, topographic clustering, virtual keypoints, cross-correlation analysis, trajectory reconstruction.*

https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.054
UDC 004.89:005.591.4

O.S. BULGAKOVA, PhD (Engineering), Associate Professor,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
9, Heroes of Ukraine ave., Mykolaiv, 54007, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-6587-8573
sashabulgakova2@gmail.com

FROM INDIVIDUAL CANDIDATE SUITABILITY TO EXPERT PANEL COMPOSITION IN COMPLEX SYSTEMS REENGINEERING

Expert group composition significantly affects the validity and reliability of decisions in complex systems reengineering. Existing expert evaluation methods mainly address the elicitation, reconciliation, and aggregation of judgments, while expert-finding approaches typically focus on assessing individual candidate suitability. This study distinguishes candidate suitability assessment from subsequent expert group selection and examines their relationship. A formal problem statement is proposed in which an expert group is selected from an available candidate pool according to the target domain, required functional roles and competencies, as well as institutional, independence, and conflict-of-interest constraints. The proposed formulation provides a methodological basis for developing intelligent expert selection systems for complex systems reengineering.

Keywords**:** *candidate suitability, expert panel, panel composition, expert selection, complex systems reengineering, requirements specification, expert evaluation, decision support systems.*

Introduction

The development of reengineering projects in complex socio-technical, organizational, and information systems is accompanied by an increasing role of expert knowledge in decision-making processes. The construction of intelligent expert systems for reengineering design requires consideration of the characteristics of the object under study, the nature of the design tasks being solved, and the conditions under which decisions are made. The requirements for the subject-matter competencies and func-

Cite: Bulgakova O.S. From Individual Candidate Suitability to Expert Panel Composition in Complex Systems Reengineering. *Information Technologies and Systems*. 4 (10). 2026. 54—67. https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.054

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

tional roles of the specialists involved depend on the content of a particular reengineering task and, consequently, determine the principles according to which the expert panel should be composed.

Reengineering is applied when local improvement of individual system elements is insufficient to achieve the established objectives. Unlike gradual modernization, which is mainly directed at improving particular characteristics of an existing system, reengineering involves reconsidering its operating principles, structure, processes, and relationships between components. The concept was initially associated primarily with business-process transformation [1–7]. The development of information technologies and process-management methods subsequently extended reengineering principles to organizational processes, information systems, and digitally supported business transformation [8, 9]. Related assessment and adaptation tasks are also considered in the reengineering of critical infrastructure facilities [10].

According to contemporary systems engineering principles, a complex system may include hardware and software, data, personnel, processes, procedures, infrastructure, and other interconnected elements [11–12]. A change in one element may affect other components and the operation of the system as a whole. For this reason, reengineering cannot be limited to designing a new structure or automating individual operations. It must also address system objectives, stakeholder needs, functional and non-functional requirements, processes, information flows, resource limitations, risks, and the expected consequences of transformation. Many decisions arising in this context cannot be made solely from quantitative data. Some criteria are qualitative, some indicators are predictive or incomplete, and their importance may vary according to project objectives and stakeholder interests.

The problem statement. Expert judgments are used to identify deficiencies in the current state of a system, clarify requirements for its target state, develop and screen design alternatives, establish evaluation criteria, assess qualitative characteristics, anticipate the consequences of transformation, and analyze risks and constraints. The reliability of the resulting decisions depends both on how these judgments are collected and processed and on whether the selected specialists possess the knowledge and experience required for the task under consideration.

Analysis of recent studies and publications. Previous research indicates that involving specialists whose expertise is insufficiently related to the problem may reduce the validity of the final assessment, even when their judgments are processed correctly [13]. Other studies associate non-formalized panel composition with subjective candidate selection, incomplete coverage of the required competencies, institutional dependence, and limited reproducibility of the selection procedure. Candidate suitability assessment and expert panel composition represent two related but distinct decisions. An individual suitability score describes the correspondence between one candidate and a particular task or subject domain.

It does not show whether a group of highly ranked candidates jointly covers all required areas, competencies, and functional roles. A panel composed only of the candidates with the highest individual scores may lack a specialist needed for a particular aspect of the reengineering task. It may also violate requirements concerning independence, institutional representation, conflicts of interest, inter-candidate relationships, or panel size.

This distinction is particularly important in complex systems reengineering. Different tasks within the same project may require different types of knowledge, and candidate suitability is therefore not an absolute professional characteristic. A specialist may have extensive experience and a strong publication record but still have limited relevance to the target domain of a particular task. Likewise, subject-matter relevance alone does not establish that the candidate can perform the required function within the panel. Individual assessment must therefore precede panel composition, while the final decision must consider both candidate-level characteristics and panel-level requirements.

Established expert evaluation methods address a different part of this process. Delphi, the Analytic Hierarchy Process, SHELF, and Cooke's Classical Model provide procedures for eliciting, structuring, calibrating, weighting, reconciling, or aggregating judgments [14–17]. Their application normally begins after the participants have been identified. The composition of the panel is either treated as a predefined condition of the study or determined through a separate organizational procedure. These methods can improve the treatment of expert judgments, but they do not explain how the initial candidate pool should be searched, how candidate suitability should be assessed for a particular domain, or how the final panel should be assembled. Candidate identification and assessment are studied under the terms expert finding, expertise retrieval, expert recommendation, reviewer recommendation, and reviewer assignment. Expert finding methods use information retrieval, text analysis, topic modeling, graph-based techniques, and professional profile representations to estimate the correspondence between a candidate and a target subject area [18, 19]. Fuzzy-logic methods can also be used to construct and process expert matrices under uncertainty [20]. Reviewer recommendation and assignment systems additionally consider thematic correspondence, workload, conflicts of interest, and assignment constraints [12, 21–22]. Most approaches construct a representation of individual expertise from publications, documents, professional activities, or links to particular topics. The general result is a suitability estimate for a candidate in relation to a given evaluation object. More recent studies also account for multiple thematic aspects, reviewer preferences, workload, conflicts of interest, assignment fairness, and uncertainty in the initial estimates.

Existing studies thus provide methods for processing judgments, estimating individual candidate suitability, and generating constrained reviewer assignments. However, the transition between individual assessment and the composition of an expert panel for complex systems reengineering

remains insufficiently specified. In this setting, the selected experts must jointly cover the target domain, required competencies, and functional roles while satisfying restrictions related to independence, institutional representation, conflicts of interest, inter-candidate dependence, availability, and panel size. These requirements characterize the panel as a whole and cannot be replaced by individual suitability scores.

The research goal. The purpose of this paper is to formalize the transition from individual candidate suitability assessment to expert panel composition in complex systems reengineering. The study separates these procedures and defines the information required at each stage. A reengineering task is associated with a target domain, a set of functional roles, a set of required competencies, and constraints governing panel composition. Individual suitability estimates are treated as inputs to the composition problem rather than as substitutes for panel-level requirements.

The main result is a formal problem statement in which an expert panel is selected from an available candidate pool according to individual suitability, role and competence coverage, and constraints related to panel size, independence, conflicts of interest, institutional representation, inter-candidate dependence, and availability. This formulation establishes a clear boundary between assessing a candidate and evaluating a panel as a whole.

Problem Statement

For complex systems reengineering design tasks, it is important not only to ensure the consistency of expert positions but also to involve specialists who jointly cover the required subject areas and functional roles. This creates a methodological gap between the stage of expert panel composition and the subsequent stages of eliciting, reconciling, and aggregating expert assessments:

$$\textit{expert panel composition} \rightarrow \textit{elicitation of expert assessments} \rightarrow \rightarrow \textit{reconciliation and aggregation of assessments}.$$

Methods for eliciting, reconciling, and aggregating expert assessments are described in detail in the scientific literature, whereas the preliminary stage of expert panel composition remains insufficiently formalized. It is not always established from which pool of candidates the panel was composed, which indicators were used to compare the candidates, how their correspondence to a particular subject area was determined, how the required roles were covered, and how institutional constraints were taken into account.

This problem is particularly important for the reengineering design of complex systems. Since different tasks within the same project may require different types of knowledge, specialist suitability is not an absolute characteristic. A candidate may have a high overall level of qualification but not correspond to the subject area of a particular task. Like-

wise, a large number of publications or extensive professional experience does not guarantee the ability to perform the required functional role within the panel.

Definition 1. The requirements specification for an expert panel for the reengineering design task T^* is defined as the ordered set

$$\mathrm{Re}\, q_E(T^*) = \left(D^*, R^*, C^*, O^*\right), \tag{1}$$

where D^* is the target domain within which the task is addressed; R^* is the set of functional roles required for its expert examination; C^* is the set of competencies required to perform the defined functional roles; and O^* is the set of constraints concerning panel size, expert independence, conflicts of interest, institutional representation, interdependence among candidates, and other properties of the panel composition.

The initial set of potential candidates for participation in the expert examination is denoted as

$$\Omega = \{e_1, e_2, ..., e_N\}, \tag{2}$$

where e_i is the i-th candidate for the expert panel, $i = 1–N$. The problem of expert panel composition then consists in determining a subset

$$E^* \subseteq \Omega, \tag{3}$$

whose composition corresponds to the requirements specification in (1).

Relations (1)—(3) define the general statement of the problem under study. Its solution requires the formalization of procedures for processing heterogeneous professional data about candidates, determining their correspondence to the requirements of a particular task, and justifying the expert panel composition with consideration of both the individual characteristics of the candidates and the requirements for the panel as a whole.

The requirements for an expert panel cannot be established independently of the content of a particular task. A specialist with considerable experience in a certain field may meet the requirements of one reengineering design task but be insufficiently suitable for another, even if both tasks concern the same object. This is caused by differences in the content of design decisions, the set of required competencies, the functions of the participants in the expert examination, and the constraints imposed on the panel composition. Candidate suitability should therefore be considered not as a permanent characteristic of a specialist but as the result of comparing the candidate's professional profile with the requirements of a particular task defined in (1).

The components of (1) describe requirements not only for individual candidates but also for the panel as a whole. At the individual level, correspondence to the target domain, professional and project experience, possession of the required competencies, ability to perform a defined role, independence, and evidence supporting professional achievements are

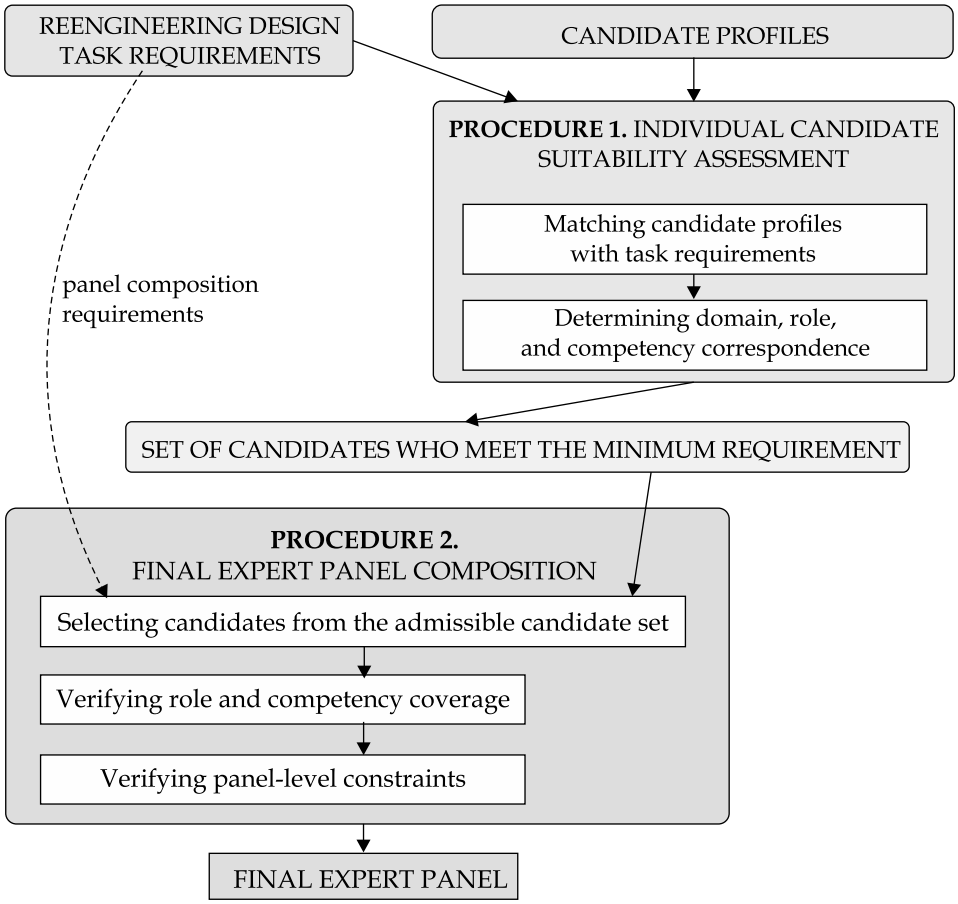


Fig. 1. Relationship between individual candidate suitability assessment and final expert panel composition

considered. At the panel level, the completeness of role and competence coverage, the balance of professional positions, panel size, institutional representation, and the admissibility of professional or organizational relationships among participants are evaluated. It is therefore necessary to distinguish between two interconnected procedures: individual candidate suitability assessment and final expert panel composition.

Individual candidate suitability assessment is aimed at determining the correspondence of each candidate to the target domain, functional role, and competence requirements of a particular reengineering design task. Its result is an individual candidate suitability assessment and the identification of a set of persons who satisfy the established minimum requirements.

Final expert panel composition involves selecting from this set a panel that provides the required role and competence coverage and satisfies the constraints concerning panel size, compatibility, independence, and organizational representation. High individual candidate suitability is a necessary but insufficient condition for inclusion in the expert panel. The final

decision depends not only on the characteristics of an individual candidate but also on the candidate's contribution to the integrity, balance, and admissibility of the panel composition. The conceptual distinction between these procedures is presented in Fig. 1. The result of individual suitability assessment is used as input information for panel composition but does not determine the final composition automatically. The first procedure establishes whether individual candidates correspond to the task requirements, whereas the second verifies whether the selected set of candidates satisfies the requirements for the panel as a whole.

Formalization of Expert Panel Composition Requirements

The first component of the requirements specification is the target domain D^*. It is determined by the content of the reengineering design task and covers the concepts, processes, objects, technologies, and regulatory requirements that must be understood by the participants in the expert examination. For complex systems, the target domain may have a multicomponent structure and include technical, informational, economic, organizational, legal, and social aspects. Domain competence characterizes a candidate's ability to understand the nature of the reengineering object, analyze its current state, identify problems, and justify possible directions for transformation. It is formed through theoretical knowledge, practical experience, participation in relevant projects, research activities, development of methodological materials, publication activity, and the performance of professional functions in the corresponding field.

An academic degree, a large number of publications, or extensive professional experience is not sufficient grounds for including a candidate in the panel. These characteristics reflect the candidate's general professional level but do not always confirm correspondence to a particular task. For example, a large number of publications on a related topic does not guarantee experience in analyzing the specific processes or technologies addressed by the reengineering project. Similarly, extensive professional experience may be accompanied by a lack of experience in applying contemporary design methods and tools. Assessment of domain competence must therefore take into account not only the scope of a candidate's professional activity but also its substantive correspondence to the target domain D^*. Information about the candidate must be compared with the thematic areas of the task. Sources of such information may include curricula vitae, publication lists, digital research profiles, descriptions of completed projects, information about professional positions, certificates, expert reports, and other available evidence of professional activity.

For candidate e_i, correspondence to the target domain can be represented by the mapping

$$q_D(e_i, D^*) \to [0, 1], \tag{4}$$

where $q_D(e_i, D^*)$ determines the assessment of the correspondence between candidate e_i and the target domain D^*, 0 — the absence of sufficiently confirmed correspondence, 1 — high correspondence.

Formula (4) specifies only the general assessment principle and does not determine a particular method for calculating the indicator. The value may be derived from a set of features characterizing the thematic proximity of the candidate's professional activity to the task, the duration and recency of the candidate's experience, participation in relevant projects, the availability of professional results, and the degree to which the data used are supported by evidence.

The recency and duration of experience should be distinguished. Information about activities undertaken many years ago may be less significant for tasks involving rapidly changing technologies. In other cases, particularly when long-term organizational or manufacturing processes are analyzed, accumulated experience may be especially valuable. The importance of temporal characteristics should be determined by the specific features of task T^* rather than applied equally to all candidates. The reliability of the available information also requires separate consideration. Professional characteristics reported by a candidate have a different level of confirmation from information obtained from official registers, institutional websites, bibliographic databases, or documentation relating to completed projects. Candidate assessment must therefore consider not only the presence of a particular characteristic but also the quality of the evidence supporting it.

The next component of specification (1) is the set of functional roles $R^* = \{r_1, r_2, \ldots, r_K\}$. A functional role defines the purpose of an expert in solving the task, that is, the type of analysis, assessment, or professional representation that the expert must provide. A role is not identical to a candidate's position, specialty, or academic title. The same position may involve different types of professional activity, while specialists with the same education may perform different functions during the expert examination.

Reengineering design tasks may require experts who analyze system architecture, functional and information processes, the technical feasibility of proposed solutions, economic viability, risks, regulatory constraints, user needs, or the organizational consequences of transformation. The set of roles depends on the type of system and the objectives of reengineering and must therefore be established separately for each task. For example, the transformation of an information system may require the roles of a system architect, domain specialist, business-process analyst, data specialist, information security specialist, user representative, and independent evaluator. For the reengineering of a manufacturing or socio-technical system, the set of roles will be different and may include technological, economic, environmental, legal, and social specialists.

A candidate may be able to perform one or several roles. Candidate correspondence to a role can be represented as

$$q_R(e_i, r_k) \to [0, 1], \tag{5}$$

where $q_R(e_i, r_k)$ is the assessment of the ability of candidate e_i to perform role r_k.

This representation is particularly important for interdisciplinary tasks, where the distribution of functional roles makes it possible to determine which aspects of a design decision must be represented and examined.

The set of competencies required to solve task T^* is defined as $C^* = \{c_1, c_2, \ldots, c_M\}$. A competency is understood as a confirmed ability of a specialist to apply knowledge, skills, and professional experience in performing defined functions. Competencies specify the content of functional roles and make it possible to move from a general role name to characteristics that can be identified and assessed using the available information about candidates. For each role, a subset of the required competencies must be established. The presence and confirmation of competency c_m in candidate e_i can be represented as

$$q_C(e_i, c_M) \to [0, 1]. \tag{6}$$

Candidate suitability for the task can be represented in generalized form as

$$S_i(T^*) = F(q_D(e_i, D^*), \{q_R(e_i, r_k)\}, \{q_C(e_i, c_m)\}, u_i), \tag{7}$$

where $S_i(T^*)$ is the assessment of the individual suitability of candidate e_i can for task T^*, and u_i represents other characteristics of the candidate.

The values $S_i(T^*)$ characterizes the individual suitability of a candidate but does not automatically determine the candidate's inclusion in the final expert panel. The decision also depends on the role and competence coverage already provided by other candidates and on the constraints imposed on the panel composition.

During panel composition, the requirements specification O^* must be satisfied. It may include:

- Minimum and maximum panel-size constraints.
- Requirements for functional-role coverage.
- Requirements for the presence of critical competencies.
- Restrictions on the number of representatives from the same institution.
- Requirements concerning the involvement of internal and external experts.
- Conditions concerning independence and the absence of unacceptable conflicts of interest.
- Restrictions on interdependence among panel members.
- Requirements concerning expert availability during a specified period.
- Resource, time, and organizational constraints.

Constraints may be mandatory or desirable. Mandatory constraints determine whether a panel composition is admissible: if any of them is violated, the resulting panel cannot be used. Desirable constraints are ap-

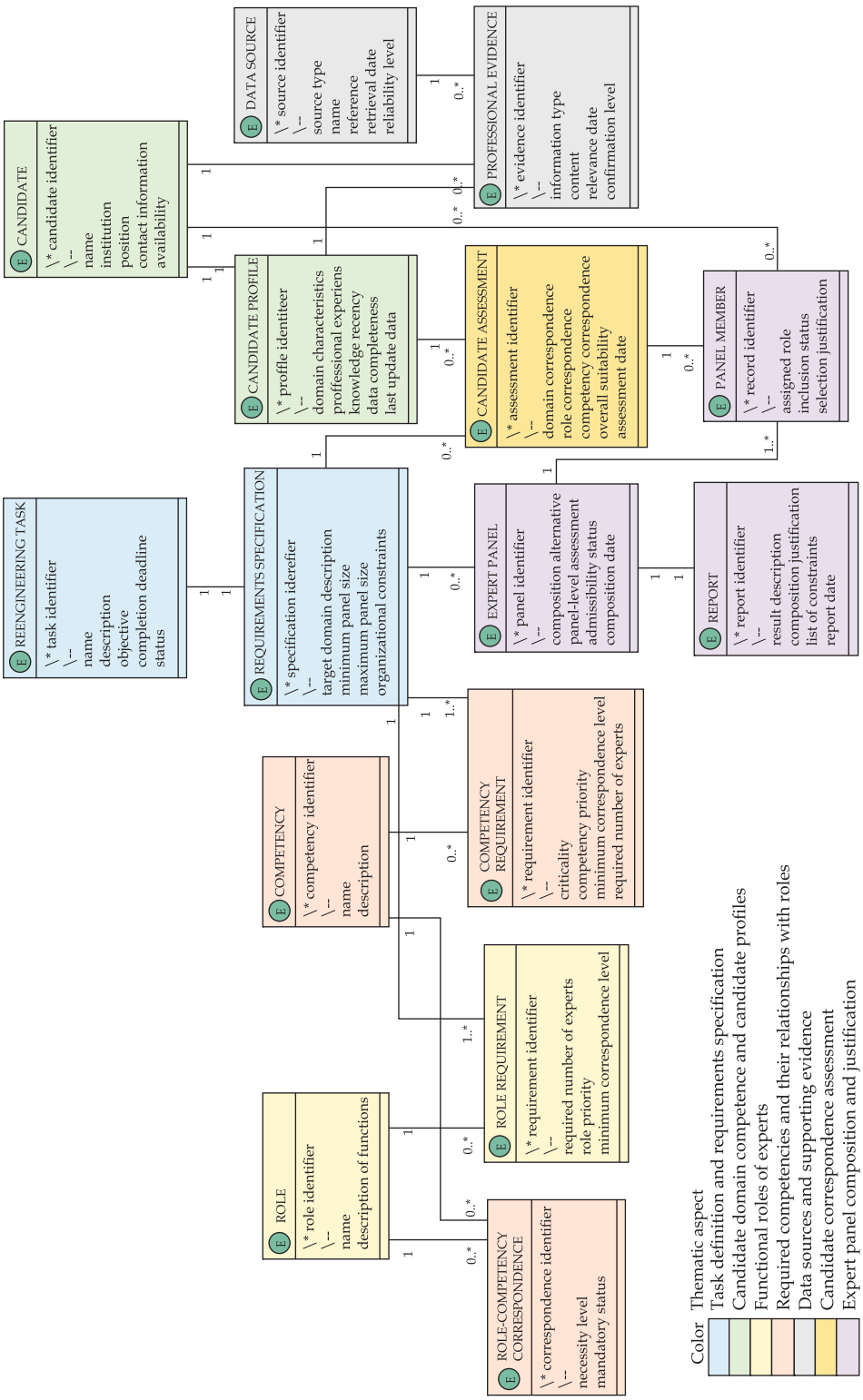


Fig. 2. Information model of the entities involved in expert panel composition for reengineering design tasks

plied to compare several admissible alternatives and select a more balanced composition.

The requirements considered above are interrelated and form a unified information structure for expert panel composition, as presented in Fig. 2.

The main groups of entities in Fig. 2 are distinguished by color according to the considered aspects of panel composition. The model connects the reengineering design task with the target domain, functional roles, competencies, candidate characteristics, individual suitability assessment, panel-level constraints, and the resulting expert panel composition.

Conclusions

The study distinguishes two interconnected procedures involved in expert selection for complex systems reengineering: individual candidate suitability assessment and final expert panel composition. The result of the first procedure provides input data for the second but does not determine the final panel automatically.

Individual suitability characterizes the correspondence of a candidate to the target domain, required functional roles, and competencies of a particular reengineering task. High individual suitability is a necessary but insufficient condition for inclusion in the panel. The final decision also depends on the candidate's contribution to role and competency coverage and on compliance with the constraints imposed on the panel as a whole. The requirements for expert panel composition are represented by the target domain, functional roles, required competencies, and panel-level constraints. The latter include panel size, institutional representation, independence, conflicts of interest, interdependence among candidates, availability, and organizational limitations. Separating individual characteristics from panel-level requirements prevents these different factors from being combined into a single candidate score.

The resulting formalization connects the reengineering task, candidate profiles, individual suitability assessments, and the final expert panel composition within a unified information structure. It can be used as a basis for developing decision-support procedures in which the selected panel is justified not only by the suitability of its individual members but also by the completeness, balance, and admissibility of its composition. Further research should address the development of a panel composition algorithm and its evaluation using real candidate data and reengineering tasks.

DECLARATIONS

Conflict of interest. *O.S. Bulgakova declares that she has no known competing financial interests or personal relationships that could have influenced the work reported in this paper.*

Funding*. This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.*

AI and tools usage*. The author acknowledges the use of ChatGPT by OpenAI during the preparation of this manuscript. The AI system was used for linguistic improvement of the English text, stylistic editing, verification of terminology for compliance with IEEE standards, and for-*

matting and standardization of the reference list in accordance with the journal's requirements. The use of AI was limited exclusively to technical, linguistic, and editorial assistance. All scientific content, mathematical formulations, research results, conclusions, and final verification of data accuracy were developed or performed solely by the author. The author takes full responsibility for the accuracy, reliability, originality, and integrity of the submitted work.

REFERENCES

1. Manganelli R.L., Klein M.M. *The Reengineering Handbook: A Step-by-Step Guide to Business Transformation*. AMACOM, New York, 1994, 318 p.
2. Davenport T.H. *Process Innovation: Reengineering Work through Information Technology*. Harvard Business School Press, Boston, 1993, 337 p.
3. May D., Kettelhut M.C. Managing human issues in reengineering projects. *Journal of Systems Management*, 1996, Vol. 47 (1), 4-11.
4. Guha S., Kettinger W.J., Teng J.T.C. Business process reengineering: Building a comprehensive methodology. *Information Systems Management*, 1993, Vol. 10 (3), 13-22. https://doi.org/10.1080/10580539308906939
5. Davenport T.H., Short J.E. The new industrial engineering: Information technology and business process redesign. *Sloan Management Review*, 1990, Vol. 31 (4), 11-27.
6. Reijers H.A., Mansar S.L. Best practices in business process redesign: An overview and qualitative evaluation of successful redesign heuristics. *Omega*, 2005, Vol. 33 (4), 283–306. https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.04.012.
7. Hammer M., Champy J. *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution*. Zondervan, Grand Rapids, 2009, 272 p.
8. vom Brocke J., Mendling J. (eds.). *Business Process Management Cases: Digital Innovation and Business Transformation in Practice*. Springer, Cham, 2018, 610 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58307-5
9. van der Aalst W.M.P. Process mining: A 360 degree overview. In: van der Aalst W.M.P., Carmona J. (eds.). *Process Mining Handbook. Lecture Notes in Business Information Processing*, Vol. 448. Springer, Cham, 2022, 3–34. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08848-3_1
10. Perederyi V., Borchik E., Zosimov V., Bulgakova O. Functional stability assessment and adaptation for critical infrastructure facilities. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 2026, Vol. 9, Article 1777258. https://doi.org/10.3389/frai.2026.1777258
11. ISO/IEC/IEEE 15288:2023. Systems and Software Engineering – System Life Cycle Processes. 2nd ed. International Organization for Standardization, Geneva, 2023, 116 p. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2023.10123367
12. *International Council on Systems Engineering. Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*. 5th ed. John Wiley & Sons, Hoboken, 2023, 368 p.
13. Aksoy M., Yanik S., Amasyali M.F. Reviewer assignment problem: A systematic review of the literature. *ArXiv*, 2023, arXiv:2304.00353. https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.00353
14. Nasa P., Jain R., Juneja D. Delphi methodology in healthcare research: How to decide its appropriateness. *World Journal of Methodology*, 2021, Vol. 11 (4), 116-129. https://doi.org/10.5662/wjm.v11.i4.116
15. Canco I., Kruja D., Iancu T. AHP, a reliable method for quality decision making: A case study in business. *Sustainability*, 2021, Vol. 13 (24), Article 13932. https://doi.org/10.3390/su132413932
16. Williams C.J., Wilson K.J., Wilson N. A comparison of prior elicitation aggregation using the Classical Method and SHELF. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*, 2021, Vol. 184 (3), 920–940. https://doi.org/10.1111/rssa.12691
17. Cooke R.M., Goossens L.H.J. Procedures Guide for Structured Expert Judgement. Project Report EUR 18820. European Communities, Luxembourg, 2000, 55 p.

18. Lin S., Hong W., Wang D., Li T. A survey on expert finding techniques. *Journal of Intelligent Information Systems*, 2017, Vol. 49 (2), 255-279. https://doi.org/10.1007/s10844-016-0440-5
19. Zosimov V.V., Bulgakova O.S. Web data displaying approach based on user's semantic profile templates. *2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Zbarazh, Ukraine, 2020, 428-431. https://doi.org/10.1109/CSIT49958.2020.9321839
20. Osypenko V., Korohod H., Zlotenko B., Chuprynka N., Yakhno V. Synthesis of expert matrices in inductive system-analytical research based on fuzzy logic algorithm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024, Vol. 4, No. 4 (130), 54-62. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310326
21. Aitymbetov N., Zorbas D. Autonomous machine learning-based peer reviewer selection system. *The 31st International Conference on Computational Linguistics: System Demonstrations*, Abu Dhabi, UAE, 2025, 199–207. URL: https://aclanthology.org/2025.coling-demos.20/ [Accessed 11 May. 2026]
22. Karan V.M., McQuistin S., Yanagida R., Perkins C., Tyson G., Castro I., Healey P.G.T., Purver M. A dataset for expert reviewer recommendation with large language models as zero-shot rankers. *The 31st International Conference on Computational Linguistics*, Abu Dhabi, UAE, 2025, 11422–11427. URL: https://aclanthology.org/2025.coling-main.756/ [Accessed 11 May. 2026]

Received 07.08.2026
Accepted 18.09.2026
Published 23.10.2026

О.С. БУЛГАКОВА, канд. техн. наук, доцент,
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
просп. Героїв України, 9, Миколаїв, 54007, Україна
https://orcid.org/0000-0002-6587-8573
sashabulgakova2@gmail.com

ВІД ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ПРИДАТНОСТІ КАНДИДАТІВ ДО ФОРМУВАННЯ ЕКСПЕРТНОЇ ГРУПИ В РЕІНЖИНІРИНГУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Вступ. У реінжинірингу складних систем експертів залучають до аналізу станів *AS-IS* і *TO-BE*, уточнення вимог, формування проєктних альтернатив, оцінювання ризиків та вибору варіанта перетворення. Зазвичай увага зосереджується на тому, як отримати судження експертів, перевірити їх узгодженість і сформувати підсумкову оцінку. Питання про те, чому до групи включено саме цих фахівців, часто залишається поза межами формальної процедури. Методи *Delphi*, *AHP*, *MCDA*, *SHELF* і класична модель Кука починають застосовувати тоді, коли учасників експертизи вже визначено. У задачах *expert finding* і *reviewer recommendation* навпаки оцінюється відповідність між кандидатом та об'єктом експертизи. *Reviewer assignment* доповнює такі оцінки правилами розподілу, обмеженнями щодо навантаження та врахуванням конфліктів інтересів. Проте реінжиніринг складної системи не зводиться до призначення рецензента на окрему публікацію або заявку. Для такої задачі потрібна група, члени якої разом охоплюють предметні напрями, компетентності та функційні ролі, визначені умовами проєкту.

Мета роботи. Розмежувати оцінювання індивідуальної придатності кандидата і формування складу експертної групи, представити формальну постановку їх послідовного використання в задачах реінжинірингу складних систем.

Методи. Проведено порівняльний аналіз двох груп підходів: методів отримання та опрацювання експертних суджень і методів пошуку, рекомендації та призначення експертів. Складові задачі та зв'язки між ними описано засобами системного аналізу, формалізації й теоретико-множинного подання. Специфі-

кація вимог до експертної групи охоплює цільову предметну область, необхідні функційні ролі, професійні компетентності та обмеження щодо її складу. Початковими даними є множина можливих кандидатів, з якої необхідно сформувати групу відповідно до встановлених вимог.

Результати. Аналіз засвідчив, що індивідуальна придатність і відповідність групи не є тотожними характеристиками. Оцінка кандидата показує, наскільки його професійні дані відповідають конкретній предметній області та поставленій задачі. Однак проста сукупність кандидатів із найвищими оцінками може не містити фахівців для виконання всіх необхідних ролей або залишити частину компетентностей без належного представлення. Окремої перевірки потребують інституційна залежність, конфлікти інтересів і професійні зв'язки між учасниками. Тому оцінювання кандидатів розглядається як попередній етап, результатом якого є індивідуальні оцінки їхньої придатності. На наступному етапі з початкової множини кандидатів формується група, яка має відповідати визначеній специфікації вимог. Така постановка не передбачає включення всіх вимог до одного рейтингового бала. Предметна придатність характеризує окремого кандидата, тоді як рольове та компетентнісне покриття, чисельність, незалежність і представництво характеризують склад групи загалом.

Висновки. Перехід від індивідуальної оцінки кандидата до складу експертної групи потребує окремої формальної процедури. Рейтинг кандидатів може використовуватися як її вхід, але не замінює перевірку групових вимог. Запропонована постановка встановлює межу між оцінюванням окремого фахівця та формуванням групи з урахуванням предметних, рольових, компетентнісних й організаційних вимог. Надалі вона може бути доповнена моделлю розрахунку предметно залежної придатності та процедурою вибору складу групи відповідно до заданих обмежень.

***Ключові слова**: придатність кандидата, експертна група, склад групи, відбір експертів, реінжиніринг складних систем, експертне оцінювання, системи підтримки прийняття рішень.*

https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.068
UDC 004.274

O.G. IVANCHENKO, Assistant,
Department of Software Systems and Technologies,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
24, Bohdana Havrylyshyna St., Kyiv, 02000, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-8526-8211
duchnov@ukr.net
D.O. KOLOMARENKO, Student,
Department of Software Systems and Technologies,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
24, Bohdana Havrylyshyna St., Kyiv, 02000, Ukraine
https://orcid.org/0009-0006-0213-5111
dmytrii_kolomarenko@knu.ua

SEMANTIC SEARCH OF TEXT DOCUMENTS

Search systems are essential part of computer systems usage, and in particular for information retrival and usage. To address the problem of efectivness of information retrival semantic search systems can be used, as they provide deep searching capabilities due to usage of neural models for perception of text semantic and meaning. This enables a more comprehensive relevancy of search results comparing to classical lexical search methods. This paper address problem of designing a semantic search system that can be used for search in local documents collection. For achieving this goal an architecture with usage of vector database (ChromaDB), neural model execution service (Ollama) and asyncronous task queue service (Celery) is proposed. The developed system provides precision and recall of 56.67% and 94.44% corespondingly, which is on the level with analogs. Also for determing the best in terms of search relevance neural model such models were compared: Doc2Vec, BERT and EmbeddingGemma.

Keywords: *semantic search, embedding models, sentence embedding, system architecture, searching efectivness.*

Introduction

Today's world is filled with a variety of information, such as blog posts, articles in magazines and on Internet resources, books, etc. In such an environment, the problem of effectively finding the necessary data arises, which arises due to the large volume of information. The process of man-

Cite: Ivanchenko O.G., Kolomarenko D.O. Semantic Search of Text Documents. Information Technologies and Systems. 4 (10). 2026. 68—80. https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.068

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

ual search for such a volume of information is often routine and time-consuming, and often practically impossible for one person. Accordingly, effective methods of searching among documents are an important topic in the field of information technology. Many existing classical search methods, such as keyword search or full-text search, are not effective enough, since their maximum is taking into account word forms and synonyms. But unlike them, semantic search takes into account not only this, but also the context and meaning of documents and user requests. Therefore, a review of the use of semantic search in text document repositories to build a system for effectively obtaining relevant information is a relevant topic.

The results obtained will be useful in the development of information retrieval systems, where it is the search by context and content that is important, and not the direct correspondence of the keywords to the text of the document query. The methods used to determine the quality of the search by precision and recall can be used to determine the degree of relevance of the results obtained for search methods in comparison with other search methods. Comparative analysis of the effectiveness of semantic search based on EmbeddingGemma and ChromaDB in comparison with classical tools, such as Apache Solr, may be needed when comparing search systems in terms of search efficiency, namely how relevant the search results are to the search query.

In general, the results obtained are the basis for creating effective search systems for stored information using locally deployed neural models for semantic search and privacy of the processed data.

Problem Statement

Search engines are an integral part of the use of computer systems, in particular for searching and using information. To solve the problem of the efficiency of information search, semantic search systems can be used, since they provide the possibility of deep search using neural models of perception of semantics and meaning of the text. This allows you to get a more complete relevance of search results with classical methods of lexical search. Accordingly, it can be argued that the topic of this article is relevant in the modern scientific world. So, the need for semantic search systems is relevant, the need forms the task of the design of such a system, and the production aspect is what technical means are used for such systems, taking into account the importance of high relevance of the obtained search results.

Literature Review

The topic of semantic search is also presented in the scientific literature. The architecture of the document repository was presented in the article [1]. The main problems that this study aims at are the low efficiency of classical keyword search methods and ensuring data confidentiality without significant loss of performance. The proposed solution is based on a

two-level indexing architecture. The first level is an encrypted inverted keyword index that supports search taking into account typos, and the second level is responsible for semantic embeddings. Experimental results confirm the high efficiency of the system. Thus, the recall increased by 22% compared to traditional methods, reaching 90.2%.

Another important problem in semantic search is distinguishing the meaning of words depending on their context. This problem is considered in the article [2]. It proposes a hybrid approach based on a combination of metaheuristic algorithms and deep learning. The main idea is to use a neural network as a surrogate fitness function within the simulated annealing algorithm, i.e. the neural network is used to find the optimal value, which in this case is the closest meaning of the word in a certain context. Experimental evaluation conducted on standard datasets (SensEval and SemEval) demonstrated the high efficiency of the proposed approach. The system achieved precision rates in the range from 74.8% to 84.6%.

As for the search process itself and the process of obtaining relevant information, these problems are also presented in the scientific literature. Yes, the article [3], which proposes an innovative approach to extracting information from descriptions of road accidents using semantic search mechanisms, is an example of using semantic search to effectively obtain relevant information. And the problem of increasing the efficiency of semantic search is investigated in the article [4]. The authors justify the need to move from basic vector search to hybrid architectures that combine linguistic analysis with neural networks. In addition, an important problem in semantic search is determining the proximity of texts. Using the example of searching for books in digital libraries, this problem is considered in the article [5]. This study found that a simple increase in the number of terms or their complete removal from the analysis process leads to a steady decrease in the relevance of search results. Also, a comparative analysis with traditional literal search confirmed the advantages of the semantic approach: while conventional search demonstrates a complete inability to understand context in long queries (efficiency drops to 53.5%), the proposed hybrid model maintains high quality results.

In addition to the actual problems of relevance of search results, an important topic is the use of which technologies are needed. An overview of embedding models is presented in the article [6]. The central part of the study is a structured comparative analysis of the technical and operational characteristics of different models. In conclusion, the authors justify the advantages of using open models as a cost-effective and transparent alternative to proprietary APIs, which is critical for ensuring data confidentiality and independence of research projects. This article can be a basis for developers and researchers when developing their own projects.

Other problems when building semantic search are taking into account the specifics of a particular subject area for which it is being developed. Such a subject area can be the tuning of search for a specific language or some industry. The topic of creating an embedding model for

languages with insufficient training data on the example of Urdu is considered in the article [7]. The study proposes a methodology for creating large-scale vector representations based on the collection and cleaning of a significant amount of unstructured text data. Optimization of embedding models for a specific industry using the example of the biomedical industry was investigated in the article [8]. The main idea of the work is to use unsupervised deep learning methods that can capture context and semantic relationships with great efficiency without the need for prior manual data markup. The study found that sentence embedding models significantly outperform approaches based only on single-word embeddings, as they better take into account the structure and context of utterances. The work proves that unsupervised neural networks are a powerful tool for natural language processing in subject areas with a large amount of specific terminology. The effectiveness of specialization of embedding models for a specific industry is proven by the study in the article [9]. The results of experiments conducted on large scientific datasets demonstrate the significant advantage of transform models, especially specialized solutions such as SciBERT, in the tasks of interest modeling and content recommendation. The study confirms that the use of semantic encoders allows to significantly increase the accuracy of information search compared to classical statistical methods.

Another important problem in the field of semantic search is the presence of bias and insufficient representativeness of certain aspects in the training data and the neural networks themselves. This problem is investigated in the article [10] using the example of the issue of gender inequality in sentence encoders. The authors note that although embedding models are the basis of high search efficiency, they can also have biases associated with the presence of social stereotypes in the training data. To solve this problem, a new flexible metric is proposed — bias score, which allows to quantitatively assess the level of gender bias at the level of entire sentences. The practical significance of the study is confirmed by the development of two methods for improving the fairness of language models: removing the most stereotypical records from the training data set and the data augmentation strategy by replacing gender markers with opposite ones.

So, as can be understood from the completeness of the presentation of the topic of semantic search and document repositories in the reviewed articles, it can be understood that its issues and problems are important and interesting for society. Thus, the problems considered are both architecture at a general level and problems of using specific technologies and methods. An important aspect when using semantic search in a specific subject area, as can be understood, is the optimization and tuning of semantic search, namely, embedding models for a specific industry, which is achieved by selecting appropriate training data. Also, the correct selection of training data and their processing are important for ensuring the quality and efficiency of the search by cleaning the training data from noise and preventing further bias of the embedding models. In addition,

the reviewed studies demonstrate a significant advantage of the semantic approach over classical search methods, such as keyword search, in those search tasks where the relevance of documents is determined by semantic proximity.

Also, since the reviewed publications did not consider a complete practical software system for semantic search in a text document repository, this study can help in the design and creation of document repository systems with the presence of their search functionality.

The Purpose of the Paper

The aim of the research is the software implementation of a text document repository using semantic search to increase the recall of the retrieval.

Within the chosen research direction, both a comparative analysis of semantic search methods will be carried out to clarify the general principles of their operation and identify the most optimal method, and the design of a software system for storing documents and searching among them to consider the practical aspect of using and implementing such systems.

Achieving the goal includes solving the following tasks:

- conduct a comparative analysis of existing semantic search methods and justify the choice of the most effective approach to maximize the recall of text document retrieval;
- design architectures and develop a software implementation of a document repository that integrates selected algorithms for semantic processing and data indexing;
- test the developed system and evaluate the search results to confirm the improvement of the recall of the retrieval.

Materials and Methods

If we consider the methods and tools used for semantic search, they are based on vector search and sentence embedding — a set of natural language processing methods where sentences are mapped to vectors of real numbers. Here, we will consider such methods and tools based on neural networks as Doc2Vec, Google BERT and EmbeddingGemma.

Doc2Vec is based on the Word2Vec methodology. Doc2Vec is a natural language processing (NLP) approach that allows for vector representation of larger blocks of text, such as sentences, paragraphs or entire documents. This method was developed by Le and Mikolov and is also known as the paragraph vector.

Doc2Vec is based on the same principles as Word2Vec, which uses a neural network model to learn word associations from a large corpus of text and generates a multidimensional space (typically several hundred dimensions), where each unique word in the corpus is assigned a corresponding vector in this space. Word vectors are arranged in a vector space in such a way that words with similar contexts are close to each other.

Doc2Vec, unlike Word2Vec, is designed to capture the context of entire texts or paragraphs, rather than just the local context of individual words. It achieves this by introducing a new vector, the document vector (or paragraph vector), which is trained together with the word vectors.

Doc2Vec can capture semantic relationships between documents, allowing for tasks such as document similarity and clustering. Moreover, documents are represented as dense vectors in a continuous space, making them suitable for various machine learning algorithms and thus allowing for efficient processing of large datasets.

Although Doc2Vec is very powerful, it also has some limitations. The quality of the vectors is highly dependent on the size and representativeness of the training corpus. It can be computationally intensive, requiring significant hardware resources for large datasets. Additionally, like many machine learning models, it may require tuning a number of hyperparameters to optimize performance for specific tasks [11].

BERT is a deep learning language model designed to improve the performance of natural language processing (NLP) tasks. It is known for its ability to take context into account by analyzing the relationships between words in a sentence bidirectionally. It was introduced by Google researchers in a 2018 paper titled "BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding." Since then, BERT has been refined for use in a variety of fields, including biology, data science, and medicine.

BERT stands for Bidirectional Encoder Representations from Transformers. Bidirectionality means that each token — the elementary part of a document used for processing — is simultaneously associated with every other token in the input data.

Encoders are components of a neural network that transform input data into representations that are easier for machine learning algorithms to process. After an encoder reads the input text, it generates a hidden state vector. Hidden state vectors are lists of values and internal parameters that provide additional context. This packaged representation of the information is then passed to a transformer.

A transformer uses the above information to infer patterns or make predictions. A transformer is a deep learning architecture that transforms input data into another type of output data. Almost all NLP applications use transformers. Transformers typically consist of an encoder and a decoder. However, BERT uses only the encoding part of the transformer [12].

EmbeddingGemma is a multilingual text embedding model with 308 million parameters based on Gemma 3. It is optimized for use on everyday devices such as phones, laptops, and tablets. The model creates numerical representations of text for use in subsequent tasks such as information retrieval, semantic similarity search, classification, and clustering [13].

EmbeddingGemma uses an encoder-only model adapted from a pretrained decoder-only Gemma 3 model with 300 million parameters. Specifically, the Gemma 3 model was adapted into an encoder-decoder model according to the T5Gemma recipe, and then EmbeddingGemma was

initialized with the encoder of this encoder-decoder model. Thus, EmbeddingGemma can leverage Gemma 3's vast world knowledge. Using encoder-decoder adaptation further ensures that the encoder can produce expressive representations from the start [14].

EmbeddingGemma includes the following key features. This model has a broad understanding of linguistic data and has been trained on over 100 languages. It can be tuned to output sizes from 768 to 128 for speed-size trade-offs using Matryoshka Representation Learning (MRL). This model also has a substantial input context of 2000 tokens for processing text data and documents. In terms of performance, the model uses less than 200 MB of RAM with quantization, and generative embedding occurs in less than 22 ms on EdgeTPU [13].

To select an effective and optimal method for semantic search, a research method such as comparative analysis is used. During the analysis, a quantitative comparison was made by the relevance of the received documents, namely, a comparison of the precision and recall of the search results for the given topics. To study the effectiveness of the developed system, both a qualitative comparison was used to prove the quality of the functionality provided by the system, and a quantitative comparison was used to prove the relevance of the documents provided based on the query with analogues in terms of precision and recall of the results obtained.

Results

Comparasion of the Selected Embedding Models. The above-described search methods were compared in terms of precision and recall, namely Doc2Vec, BERT, and EmbeddingGemma. Precision is the proportion of relevant samples among those selected, and recall is the proportion of selected relevant samples among all truly relevant ones. The following interpretation can be given for precision and recall: precision shows the percentage that a randomly selected document from the set of found documents is relevant,

Table 1. **Comparison of embedding models**

Theme	Model	Precision	Recall
Society & Culture	Doc2Vec	0.1100	0.0183
	BERT	0.0900	0.0150
	EmbeddingGemma	0.2200	0.0367
Science & Mathematics	Doc2Vec	0.0400	0.0067
	BERT	0.0500	0.0083
	EmbeddingGemma	0.1750	0.0292
Health	Doc2Vec	0.0600	0.0100
	BERT	0.0700	0.0117
	EmbeddingGemma	0.4700	0.7830
Computers & Internet	Doc2Vec	0.0400	0.0067
	BERT	0.0850	0.0142
	EmbeddingGemma	0.5500	0.0917

and recall shows the percentage that a randomly selected document from the set of all relevant documents will be found.

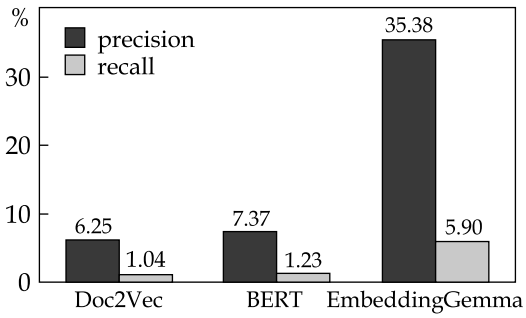


Fig. 1. Average precision and recall values for the considered models

For comparison, several questions were asked for each topic, and the search results obtained were checked for belonging to the searched topic: if the topic of the document matches, then it is counted among the relevant results, if not, then among the irrelevant ones. The pietrolesci/yahoo_answers_topics dataset [13] was used for comparison.

To compare the described methods, a comparison of how well the methods classify texts was used. This approach was used to make it easier to automate comparisons and avoid manual selection of relevant texts.

The results of the comparison are shown in Table 1 below.

A comparison of the average precision and recall between the models is shown in Figure 1.

Design of the Developed System. The system consists of the following parts: the client part (frontend) and the server part (backend), which consists of the application itself, the neural model execution service, and the vector database.

The frontend is responsible for the end user interface, which provides users with functionality for managing files and searching among them.

The application itself is responsible for the business logic of the backend, i.e. the actual search, outputting results, initiating and tracking the status of processing the uploaded document, and is also responsible for the stability of processing long documents.

The neural model execution service executes a sentence embedding model, which generates vectors corresponding to the documents or their fragments sent for processing. These vectors reflect the meaning of the document and the semantic relationships between its parts.

The vector database stores sentence embeddings, i.e. the corresponding vectors of the processed documents, and provides the functionality for searching for documents by the proximity of their vectors and the query vector.

The general algorithm of the semantic search system is based on the interaction of the client part, the task queue and the vector database. The main stages of the system operation can be presented as follows.

The user uploads a file via the /files/upload API endpoint, implemented on FastAPI. The system checks the document format for compliance with the list of supported types and saves it in local storage.

Since text indexing is a resource-intensive process, the main application does not process the file immediately, but creates a document processing task via Celery. Information about the task is transmitted to the

Redis message broker, and the user instantly receives a task identifier for status tracking.

Next, the task extracts text content from the uploaded file using the textxtract library. After this the semchunk library breaks the text into fragments (chunks), which allows you to work effectively with large documents without exceeding the limit of the neural model context.

After preparing the text, embeddings are generated. For each text fragment, the system contacts the Ollama service, which uses the EmbeddingGemma model to transform the text into vector representations (numeric vectors). These vectors reflect the semantic meaning of the fragments in a multidimensional space.

The resulting vectors, along with metadata (file name), are stored in the ChromaDB collection. This completes the process of preparing the document for search, making it available for semantic analysis.

Also, when receiving a search query via the /search method, the system vectorizes this query using the same model in Ollama. ChromaDB

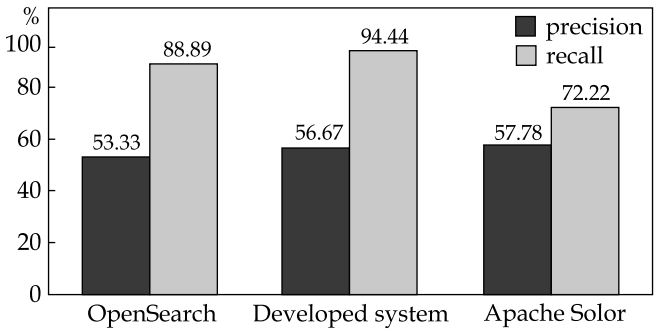


Fig. 2. Average precision and recall values for the considered systems

Table 2. **Search relevance testing results**

Theme	Request	System	Precision	Recall
bugs_and_science	what species of bugs exist	Developed	0.4000	0.6667
		OpenSearch	0.4000	0.6667
		Apache Solr	0.4000	0.6667
bugs_and_science	biological information about bugs and beetles	Developed	0.6000	1.0000
		OpenSearch	0.6000	1.0000
		Apache Solr	0.6667	0.6667
Linux	how is linux present in Europe	Developed	0.6000	1.0000
		OpenSearch	0.6000	1.0000
		Apache Solr	0.4000	0.6667
Linux	structure of linux os	Developed	0.6000	1.0000
		OpenSearch	0.4000	0.6667
		Apache Solr	0.4000	0.6667
Music	famous performers in the music industry	Developed	0.6000	1.0000
		OpenSearch	0.6000	1.0000
		Apache Solr	0.6000	1.0000
Music	romantic songs about love	Developed	0.6000	1.0000
		OpenSearch	0.6000	1.0000
		Apache Solr	1.0000	0.6667

then performs a mathematical comparison of the query vector with the vectors of the stored documents and returns the most relevant results based on semantic proximity, rather than a simple match of words.

Search Relevance Testing for the Developed System. The following methodology was used to test the relevance of search results. A set of topics was given, and for each topic, related documents were created (the texts were taken from the English-language Wikipedia). Also, for each topic, "query-document" pairs were defined, where the query is the actual query string to the search engine, and the document is the file names of documents relevant to the query, which is its identifier. The number of relevant documents for each query is 3 documents, and the maximum number of results obtained is 5.

The testing was performed by comparing the results of the developed system, OpenSearch, which was used as a semantic search platform, and Apache Solr for full-text search. For OpenSearch, Ollama was used as a model provider, namely EmbeddingGemma, to generate embeddings. For Apache Solr, the Extended DisMax (eDisMax) Query Parser is used as the query parser, allowing for the processing of stop words and synonyms, and the percentage of word matches is set to 50%, which adds relative flexibility to determine the relevance of documents.

Accordingly, the test is how well the designed system provides relevant features compared to another widely used system using the same facilities to generate sentence embeddings. The test results for the considered systems are shown in Table 2 below.

The chart in Fig. 2 presents the average values of precison and recall for the developed system and the considered systems for comparison.

Discussion of the Results

Regarding the results of the "Comparasion of the Selected Embedding Models" section, the low recall values can be explained by the fact that the number of relevant results is taken as the number of texts on the corresponding topic in general, and not as the number of search results that are issued. That is, when calculating recall, the denominator takes into account the number of all texts on this topic, and not the maximum possible number of documents that can be issued on this topic, which is less than the previous number.

The significant difference between the values of the Health and Computers & Internet topics and other topics for EmbeddingGemma can be explained by the fact that these topics are represented in the training datasets for this model and also by the fact that they have clear terms and semantic connections in these topics are quite dense.

Also, as can be seen from Fig. 1, EmbeddingGemma has the best precision and recall values, while Doc2Vec has the worst. This can be explained by several factors. First, Doc2Vec is limited to the dataset on which the neural network was trained, which is the dataset used. Second,

BERT and EmbeddingGemma use transformers and an attention mechanism that allow building higher-quality semantic connections. Third, EmbeddingGemma is trained on a larger amount of data and is built not from scratch, but on the basis of the Gemma family of neural models, i.e. it has a more advanced structure than BERT.

The results of the section "Design of the Developed System", namely the designed system model, guarantee, in addition to the necessary functionality for a document repository with support for semantic search, the system's resilience to failures and data preservation. The use of Docker containerization technology allows the system to be deployed in an isolated environment with a clear distribution of resources between AI models and the server part.

Regarding the results of the section "Search Relevance Testing for the Developed System", as can be seen from the diagram in Figure 2, the search accuracy of the developed system is not inferior to the considered analogues, and in recall it even exceeds them, which shows that the developed system will find a relevant document with a higher probability among all documents relevant to a specific query.

Conclusions

Several semantic search methods were analyzed, namely Doc2Vec, BERT, and EmbeddingGemma. All three methods are based on document vectorization — sentence embeddings, but achieve this in different ways. Doc2Vec uses Word2Vec to vectorize individual words and a document vector to obtain a general document vector. The main feature of BERT is the use of bidirectional encoders — that is, each word during processing is simultaneously associated with all other words in the sentence. EmbeddingGemma, on the other hand, uses an encoder-decoder model and is built on the basis of the large Gemma 3 language model, as well as the support of this model for over 100 languages. Based on this analysis and comparison of methods in terms of accuracy and completeness, it was shown that the most effective method in terms of the relevance of the results obtained is EmbeddingGemma. This result can be explained by the fact that EmbeddingGemma, unlike Doc2Vec, is based on a more advanced architecture using transformers and an encoder-decoder, and that this model, unlike BERT, due to its construction based on Gemma 3, is trained on a larger amount of data.

The use of EmbeddingGemma together with Ollama for its execution, ChromaDB for storing document embeddings and their search, and dividing input documents into fragments for processing large texts ensured the creation of a workable, as well as reliable and efficient system. In addition, it is also worth describing the general algorithm for EmbeddingGemma. It consists of using a series of carefully designed steps to create a concise vector representation: transformer processing — uses bidirectional attention to understand the meaning and context of each word and generate

appropriate embeddings, merging — combining all word embeddings into a single embedding, compactification — performing a linear projection into a higher-dimensional vector and reducing the resulting vector afterwards, and normalization — allows for efficient similarity comparisons.

The effectiveness and functionality of the developed system was demonstrated by comparing the developed system with analogues, which proved that it is not inferior to analogues in terms of search efficiency.

DECLARATION

Author Contributions. *Ivanchenko Oleksii: Methodology, Supervision, Writing – Review & Editing. Dmytrii Kolomarenko: Conceptualization, Software, Investigation, Data Curation, Writing – Original Draft, Visualization.*

AI and Automated Tools Usage. *During the preparation of this manuscript, the authors used Gemini (Google) for summarazing papers considered in the literature review section. Also Google Translate was used for translating from inital draft in Ukrainian to English.*

Conflict of Interest. *The authors declare no conflict of interest.*

Grant or Financial Support. *This research received no external funding.*

REFERENCES

1. Mohammed H.K., Indrani B. Secure Semantic Retrieval over Encrypted Cloud Data: A Dual-Index System with Lightweight Fuzzy Encryption and BERT-Based Semantic Indexing. *Diyala Journal of Engineering Sciences,* 2026, Vol.19 (1), 160–180. https://doi.org/10.24237/djes.2026.19112
2. Nodehi A.K., Charkari N.M. A metaheuristic with a neural surrogate function for Word Sense Disambiguation. *Machine Learning with Applications,* 2022, Vol. 9, Article 100369. https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2022.100369
3. Arteaga C., Ray U., Park J., Paz A. Semantic search approach for information extraction from traffic crash narratives. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives,* 2026, Vol. 36, Article 101888. https://doi.org/10.1016/j.trip.2026.101888
4. Mageshwari V., Shrijith J. Linguistic-Neural Hybrid Architectures for Semantic Search: Optimizing Recall with POS Filtering and Query Expansion. *IEEE Access*, 2026, Vol. 14, 28564–28572. https://doi.org/10.1109/access.2026.3663716
5. Daffa M.R., Yaqin M.A. Implementation of Semantic Similarity for Book Search in Digital Library. *Electrics, Electronics, Communications, Controls, Informatics, Systems,* 2025, Vol. 19 (3), 190–196. https://doi.org/10.21776/jeeccis.v19i3.1796
6. Abimbola J.O., Kuaban G.S., Ajayi S.A. Open-Source Embedding Models: A Comprehensive Survey of Techniques, Benchmarks, and Applications. *IEEE Access,* 2026, Vol. 14, 41284–41302. https://doi.org/10.1109/access.2026.3670100
7. Nazir S., Asif M., Sahi S. A., Ahmad S., Ghadi Ya.Ya., Aziz M.H. Toward the Development of Large-Scale Word Embedding for Low-Resourced Language. *EEE Access,* 2022, Vol. 10, 54091–54097. https://doi.org/10.1109/access.2022.3173259
8. Blagec, K., Xu, H., Agibetov, A. et al. Neural sentence embedding models for semantic similarity estimation in the biomedical domain. *BMC Bioinformatics,* 2019, Vol. 20, Article 178. https://doi.org/10.1186/s12859-019-2789-2
9. Guesmi M., Chatti M.A., Kadhim L., Joarder S., Ain Q.Ul. Semantic Interest Modeling and Content-Based Scientific Publication Recommendation Using Word Embeddings and Sentence Encoders. *Multimodal Technologies and Interaction,* 2023, Vol. 7 (9), Article 91. https://doi.org/10.3390/mti7090091
10. Dolci T., Azzalini F., Tanelli M. Improving Gender-Related Fairness in Sentence Encoders: A Semantics-Based Approach. *Data Science and Engineering,* 2023, Vol. 8, 177–195. https://doi.org/10.1007/s41019-023-00211-0
11. What is Doc2Vec? educative.io. URL: https://www.educative.io/answers/what-is-doc2vec [Accessed 23 Jan.2026]
12. What Is the BERT Model and How Does It Work? Coursera. URL: https://www.coursera.org/articles/bert-model [Accessed 23 Jan.2026]
13. EmbeddingGemma model overview. Google AI for Developers. URL: https://ai.google.dev/gemma/docs/embeddinggemma [Accessed 23 Jan.2026]

14. Vera H.S. et al.EmbeddingGemma: Powerful and Lightweight Text Representations. ArXiv, 2509.20354. https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.20354

Received 15.06.2026
Accepted 09.09.2026
Published 23.10.2026

О.Г. ІВАНЧЕНКО, асистент,
каф. програмних систем і технологій,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Богдана Гаврилишина, 24, Київ, 02000, Україна
https://orcid.org/0000-0002-8526-8211
duchnov@ukr.net
Д.О. КОЛОМАРЕНКО, студент,
каф. програмних систем і технологій,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Богдана Гаврилишина, 24, Київ, 02000, Україна
https://orcid.org/0009-0006-0213-5111
dmytrii_kolomarenko@knu.ua

СЕМАНТИЧНИЙ ПОШУК ТЕКСТОВИХ ДОКУМЕНТІВ

Вступ. Пошукові системи є невід'ємною частиною використання комп'ютерних систем, зокрема для пошуку та використання інформації. Для вирішення проблеми ефективності пошуку інформації можна використовувати системи семантичного пошуку, оскільки вони забезпечують можливості глибокого пошуку завдяки використанню нейронних моделей для сприйняття семантики та значення тексту. Це дає змогу отримати більш повну релевантність результатів пошуку порівняно з класичними методами лексичного пошуку. Відповідно можна стверджувати, що тематика цієї статті є актуальною в сьогоднішньому насиченому інформацією світі.

Мета статті. Отже потреба в семантичних пошукових системах є актульною, ця потреба формує задачу проєктування таких систем, і також важливим аспектом є які саме технічні засоби використовувати для таких систем з урахуванням важливості високої релевантності отримуваних пошукових результатів.

У межах цієї роботи було спочатку виконанно порівняння ефективності нейронних моделей вбудовувань, а саме *Doc2Vec, BERT* та *EmbeddingGemma*. Це порівняння проводилося за тим, як добре певна модель класифікує текст до певної теми, і для порівняння були використанні показники точності та повноти. Після цього було спроєктовано та розроблено власну систему семантичного пошуку, яка вже для тестування її ефективності порівнювалася з іншими пошуковими системами: *OpenSearch* як система семантичного пошуку та *Apache Solr* як система повнотекстового пошуку. Це порівняння здійснювалося вже за тим, скільки релевантних до пошукового запиту документів для кожної пошукової системи є з усіх отриманих, і порівняння теж проводилося за точністю та повнотою.

Результати. Порівняння розглянутих моделей вбудовувань показало, що найефективнішою моделлю є *EmbeddingGemma* як і за точністю — 35,38 %, так і за повнотою — 5,9 %. А порівняння розробленої системи з вище вказаними аналогами показало працездатність і ефективність розробленої системи, оскільки показники точності й повноти є на рівні з *OpenSearch* і вище ніж у *Apache Solr*, що доводить більшу якість пошукових результатів для семантичних пошукових систем ніж для класичних лексичних систем.

Висновки. Розроблена система показала, що семантичні пошукові системи з пропонованою спроєктованою архітектурою з використанням моделей вбудовувань на основі великих мовних моделей дають високі ефективність пошуку й релевантність реузльтатів пошуку.

Ключові слова: *семантичний пошук, моделі вбудовування, вбудовування речень, архітектура системи, ефективність пошуку.*

https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.081
УДК 004.6:004.8

С.О. МОТОРНЮК, аспірант,
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця,
просп. Науки, 9 А, Харків, 61165, Україна
https://orcid.org/0009-0001-7695-5415
serhii891@proton.me

МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ВІДКРИТИХ ДАНИХ ІЗ АВТОМАТИЗОВАНИМ ГЕНЕРУВАННЯМ РЕКОМЕНДАЦІЙ ТА ЗВІТІВ

У статті досліджено проблему підвищення якості відкритих даних у контексті забезпечення їх аналітичної придатності та ефективного використання в цифрових системах. Показано, що наявні підходи до оцінювання якості даних переважно мають фрагментарний і декларативний характер, не забезпечуючи автоматизованого виявлення дефектів та формування рекомендацій щодо їх усунення. Метою роботи є розроблення методу інтелектуального оцінювання якості відкритих даних із автоматизованим генеруванням рекомендацій і аналітичних звітів. Запропоновано математичну модель, що інтегрує підходи на основі правил, статистичний аналіз і методи машинного навчання для комплексного оцінювання якості, виявлення аномалій і відновлення пропущених значень. Особливістю підходу є адаптивне зважування метрик якості та формування інтегрального показника, що враховує контекст використання даних. Реалізовано програмну систему модульної архітектури, яка забезпечує повний цикл оброблення відкритих даних: від завантаження та попереднього оброблення до оцінювання, генерації рекомендацій і формування звітності. Експериментальна апробація на реальних наборах даних підтвердила ефективність запропонованого методу, зокрема зростання інтегрального показника якості та перевагу ансамблевих методів відновлення пропущених значень за метрикою середньоквадратичної помилки (Root Mean Square Error, RMSE). Отримані результати демонструють доцільність використання інтелектуальних підходів для переходу від формального забезпечення відкритості даних до підвищення їх практичної цінності.

Ключові слова: *відкриті дані, якість даних, штучний інтелект, оцінювання якості, виявлення аномалій, відновлення пропущених значень, рекомендаційні системи, аналітичні звіти, CKAN, машинне навчання.*

Цитування: Моторнюк С.О. Метод інтелектуального оцінювання якості відкри тих даних із автоматизованим генеруванням рекомендацій та звітів. Information *Technologies and Systems*, Київ, 2026, Том 4 (10), 81–98. https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.081

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

Вступ та постановка наукової проблеми

Стрімке зростання обсягів відкритих даних, що публікуються органами державного управління, науковими установами та бізнес-структурами, зумовлює необхідність забезпечення їх належної якості як ключової передумови ефективного використання у процесах прийняття рішень, аналітики та побудови інтелектуальних сервісів. Водночас на практиці відкриті дані часто характеризуються наявністю пропусків, структурних невідповідностей, семантичних суперечностей та низьким рівнем узгодженості, що істотно обмежує можливості їх повторного використання та інтеграції.

Сучасні підходи до оцінювання якості даних переважно базуються на статичних метриках і не забезпечують адаптивного аналізу складних багатовимірних характеристик даних, а також не передбачають автоматизованого формування рекомендацій щодо їх покращення. Особливої актуальності набуває використання методів штучного інтелекту, здатних інтегрувати різнорідні аспекти якості, здійснювати виявлення аномалій і відновлення відсутніх значень та формувати інтерпретовані звіти для користувача.

Метою дослідження є розроблення методу інтелектуального оцінювання якості відкритих даних, який на основі поєднання формалізованих правил валідації, статистичного аналізу та алгоритмів штучного інтелекту забезпечує автоматизоване виявлення дефектів, формування рекомендацій щодо їх усунення та генерування аналітичних звітів для підвищення аналітичної придатності та практичної цінності відкритих наборів даних.

Аналіз наявних досліджень

У межах проблематики управління якістю відкритих даних засобами штучного інтелекту особливого значення набувають праці, в яких якість даних розглядається не як сукупність ізольованих перевірок, а як системна багатовимірна характеристика, пов'язана з аналітичною придатністю, надійністю повторного використання та здатністю цифрових сервісів працювати на основі достовірних наборів. Одним із таких досліджень є робота *Carvalho* та колег, у якій на основі широкого огляду літератури було ідентифіковано 66 вимірів якості даних та запропоновано їх упорядковану структуру для побудови прикладних моделей оцінювання [1]. Методично автори спиралися на систематизований аналіз наукових публікацій із подальшим агрегуванням близьких за змістом характеристик, а основним результатом стало формування гнучкої схеми, придатної для розроблення конкретизованих рамок оцінювання якості в різних галузях. Значення цієї праці полягає в тому, що вона переконливо показує: без узгодженого набору вимірів будь-яке подальше автоматизоване оцінювання неминуче лишається фрагментарним, а отже, втрачає керованість і відтворюваність.

Логічним продовженням цього напряму є дослідження *Miller* зі співавторами, де було проведено порівняльний аналіз термінології якості даних у різних предметних областях, відібрано 116 релевантних праць із масиву 10855 знайдених публікацій та на цій основі побудовано ієрархічну модель понять [2]. Автори використали зіставлення термінів із положеннями стандарту *ISO* 25012 і, крім базових характеристик, обґрунтували введення чотирьох додаткових вимірів, а саме керованості, корисності, достатності обсягу та семантики. Вимірюваним підсумком роботи стало не лише формування розширеної моделі, а й фіксація 262 термінів, що використовуються для опису якості даних у різних доменах, що засвідчує високий рівень термінологічної розпорошеності. Для тематики відкритих даних це особливо важливо, оскільки семантична коректність, управлінська відповідальність за дані та їх корисність для повторного використання безпосередньо впливають на якість аналітичних висновків і на довіру до публічних наборів.

Від більш загальних моделей до автоматизованого оцінювання переходить праця *Al-Toq* та *Almaslukh*, у якій запропоновано узагальнену модель профілювання та класифікації якості даних на основі алгоритмів машинного навчання [3]. Дослідники реалізували послідовність попереднього оброблення, інженерії ознак, перевірок повноти, узгодженості, форматної коректності, типологічної відповідності та допустимості значень, після чого віднесли записи до трьох рівнів якості та порівняли декілька ансамблевих і деревоподібних алгоритмів. Кількісні результати показали, що після формування 49 профілювальних ознак і поділу вибірки у співвідношенні 70 до 30 найкращі моделі досягли найвищих показників точності, повноти та *F*-міри, причому *Random Forest* і градієнтні ансамблі продемонстрували майже безпомилкове розрізнення класів. Значення цього дослідження полягає у доведенні того, що поєднання формалізованих перевірок і навчальних алгоритмів може перетворити оцінювання якості даних із описової процедури на масштабовану автоматизовану технологію.

Водночас *Alexakis* та співавтори розглядають проблему ширше, поєднуючи стандарти, методології та програмні засоби керування якістю даних [4]. У межах структурованого огляду вони зіставили нормативні підходи, моделі оцінювання та сучасні інструментальні рішення, зокрема ті, що працюють із профілюванням, очищенням і моніторингом даних. Їхній аналіз показав, що наявні засоби добре підтримують автоматизацію, діагностику та роботу в режимі, наближеному до реального часу, однак залишаються слабкими щодо пояснюваності результатів, урахування витрат і адаптації до змінних процесів. Для досліджень у сфері відкритих даних ця праця є важливою тому, що вона переносить акцент із окремих показників на цілісну інфраструктуру управління якістю, де оцінювання, очищення та подальше використання даних повинні бути пов'язані в єдиному циклі.

Специфіку саме відкритих репозитаріїв даних добре розкриває дослідження *González-Vidal* та колег, де якість відкритих даних трактується одночасно як внутрішня властивість відображення реального явища та як зовнішня придатність набору для навчання інтелектуальних систем [5]. Автори запропонували набір метрик для обох аспектів і перевірили їх на реальних наборах даних із середовищ сенсорного типу. Методично праця поєднує побудову метрик, їх апробацію на практичних даних та реалізацію у відкритому середовищі обчислень, що дає змогу застосовувати оцінювання до репозитаріїв із мінімальним людським втручанням. Цінність цієї роботи для подальших досліджень полягає в тому, що вона відходить від суто формального бачення якості відкритих даних і підкреслює зв'язок між якістю набору та здатністю інтелектуальних методів отримувати з нього стійкі аналітичні результати.

У близькому, але більш каталогоорієнтованому вимірі працює *Martinez-Gil*, який запропонував автоматизовану схему оцінювання якості каталогів відкритих даних на основі аналізу точності, повноти, узгодженості, масштабованості, своєчасності, походження, читабельності та ліцензійних характеристик [6]. Як методичну основу дослідник використав формалізацію показників і їх реалізацію для каталогів, побудованих за стандартом опису наборів даних. Практичні результати перевірки на декількох порталах засвідчили суттєву нерівномірність показників: точність змінювалася приблизно від 61,11 % до 80,42 %, повнота від 50,00 % до 66,77 %, узгодженість від 76,00 % до 93,10 %, а показник походження даних у наведених прикладах виявився нульовим для всіх оцінених каталогів. Отже, навіть за формальної відкритості порталу його каталог може лишатися неповним і недостатньо надійним для серйозного аналітичного використання, що підсилює потребу в автоматизованому контролі не лише вмісту, а й описової інфраструктури відкритих даних.

Перехід від метаданих до власне змісту відкритих урядових даних демонструє *Karamanou* разом із колегами, які дослідили динамічні державні дані на прикладі транспортних потоків із грецького урядового порталу та застосували для цього кореляційний аналіз, сезонно-трендову декомпозицію та *Isolation Forest* із подальшим поясненням виявлених відхилень [7]. Результати виявили серйозні проблеми якості: 20,16 % спостережень були відсутніми, у половини сенсорів частка пропусків перебувала в діапазоні 15,5—33,43 %, середня частка аномалій на сенсор становила 71,1 %, тоді як сезонно-трендова декомпозиція зафіксувала 12,6 % відсотка аномалій у вибраній підмножині, а *Isolation forest* 11,6 %, причому перетин між цими методами виявився незначним. Саме ця праця особливо близька до технічного ядра розробок у сфері інтелектуального оцінювання якості відкритих даних, оскільки доводить ефективність комбінування статистичних процедур і машинного навчання для виявлення різних типів дефектів у динамічних наборах.

Суттєвим для публічного сектора є і дослідження *Zong* та *Wang*, у якому відкритість державних даних розглядається як чинник підвищення достовірності інформації; автори використали економетричний аналіз даних китайських компаній за 2011—2023 роки, перевірили базові залежності, гетерогенність ефектів і надійність результатів за допомогою інструментальних змінних [8]. Кількісні результати підтвердили статистично значущий позитивний вплив відкритості державних даних на достовірність корпоративної інформації, а також різну інтенсивність цього впливу залежно від регіону, форми власності й розміру компанії; у тесті ендогенності значення першого етапу також вказало на стійкість отриманих висновків. Значення цієї праці для тематики якості відкритих даних полягає в тому, що вона показує макрорівневий ефект: відкритість даних має сенс лише тоді, коли вона підвищує надійність інформаційного середовища, але сам механізм переходу від відкритості до реальної якості даних у наборі ще потребує окремих технічних рішень.

Питання організаційної готовності публічних інституцій до роботи з даними, цифровими сервісами та кризовими інформаційними потоками висвітлює *Gabay* та інші дослідники, які проаналізували впровадження інформаційних систем у державних установах в умовах надзвичайної ситуації, спираючись на модель поширення інновацій та серію глибинних інтерв'ю з учасниками проєктів [9]. Їхні результати показали, що створені системи були збережені й після завершення кризового етапу, а установи високо оцінили їх корисність, прозорість, міжвідомчу координацію та здатність швидко задовольняти потреби громадян. Для напряму, пов'язаного з інтелектуальним управлінням якістю відкритих даних, ця праця важлива тим, що демонструє практичний контекст використання якісних даних: без гнучких і зрозумілих цифрових систем навіть добре підготовлені набори не трансформуються в реальну суспільну цінність.

Jonathan зі співавторами розглянули цифрову трансформацію публічного управління у зв'язку з децентралізацією, поєднавши систематичний огляд літератури з п'ятнадцятьма напівструктурованими інтерв'ю з експертами державного сектора [10]. Дослідники дійшли висновку, що цифрові перетворення підвищують ефективність місцевого і центрального врядування, розширюють участь громадян, зміцнюють довіру та підтримують безперервність публічного адміністрування. У контексті управління якістю відкритих даних це означає, що сама по собі технічна оцінка набору є недостатньою, якщо вона не вбудована в ширший управлінський контур, де результати оцінювання можуть бути використані для міжінституційної взаємодії та прийняття рішень.

Jiao та співавтори, використовуючи панельні дані 293 міст Китаю за 2016—2022 роки та двофакторну модель фіксованих ефектів, показали, що розвиток цифрового уряду статистично значуще сприяє загальному суспільному добробуту, причому цей ефект виразніший

у менш розвинених територіях, а також у містах із колишніми бідними районами [11]. Автори простежили і механізм впливу через зміну макрофіскальних параметрів, а також дослідили модифікувальну роль просторових та інноваційних чинників. Для проблематики відкритих даних це дослідження є важливим не стільки через набір технічних процедур, скільки через висвітлення того, що якісні цифрові сервіси на державному рівні мають вимірюваний суспільний результат, а отже, потребують надійної інформаційної основи.

Подібну логіку, але вже з акцентом на штучний інтелект, розвивають *Zhang* та *Li*, які дослідили вплив розвитку інтелектуальних технологій на спроможність органів влади надавати цифрові послуги [12]. Вони використали панельні дані міського рівня, побудували індикатори інтелектуального розвитку та цифрової сервісної спроможності та перевірили посередницьку роль людського та знаннєвого капіталу. Їхні результати підтвердили статистично значуще зростання сервісної спроможності під впливом інтелектуальних технологій, а в таблицях посередницьких ефектів зафіксовано позитивні коефіцієнти для каналів, пов'язаних із людським капіталом і знаннями. Значення цієї праці полягає в тому, що вона підкреслює: інтелектуальні засоби не просто автоматизують окремі операції, а підвищують спроможність державних сервісів працювати з даними більш адресно, швидко і результативно, але ця спроможність залежить від якості самих даних.

Узагальнення розглянутих праць дає підстави стверджувати, що науковий доробок у цій сфері вже сформував кілька важливих напрямів. По-перше, достатньо глибоко опрацьовано питання класифікації та структурування вимірів якості даних. По-друге, накопичено результати щодо автоматизованого профілювання і класифікації якості із застосуванням алгоритмів машинного навчання. По-третє, у роботах про відкриті урядові дані продемонстровано як важливість змістової якості наборів, так і критичну роль якості каталогів, метаданих та цифрових сервісів, у яких ці дані функціонують. Проте між цими напрямами зберігається розрив: одні дослідження обмежуються термінологічним та концептуальним рівнем, інші зосереджуються на окремих процедурах профілювання чи класифікації, ще інші аналізують суспільний ефект цифрового врядування без переходу до рівня запису, атрибута та конкретного дефекту даних.

Невирішеними залишаються насамперед питання інтеграції багатовимірної оцінки якості відкритих даних із автоматизованим виявленням аномалій, відновленням відсутніх значень, формуванням адресних рекомендацій та генерацією аналітичних звітів у межах єдиного інструментального контуру. У більшості проаналізованих джерел або переважає описова систематизація вимірів якості без практичного механізму корекції, або реалізується вузька автоматизація окремого завдання без повноцінного переходу до управлінського рішення. Зокрема, у роботах з відкритих каталогів основна увага зо-

середжена на метаданих, ліцензіях та структурі опису, тоді як внутрішня якість самих наборів досліджується менш системно. У працях, присвячених динамічним урядовим даним, наявні сильні результати з виявлення аномалій, однак не доведено задачу до рівня інтегрального індексу якості та автоматизованого набору рекомендацій. Оглядові дослідження зі стандартів і програмних засобів переконливо показують брак пояснюваності, адаптивності та врахування вартості процедур якості, але не пропонують завершеного прикладного рішення для відкритих державних даних.

Причини того, що ці питання досі не розв'язано, мають як об'єктивний, так і суб'єктивний характер. До об'єктивних належить висока неоднорідність відкритих даних, поєднання структурованих, напівструктурованих і динамічних масивів, залежність оцінок якості від контексту використання, а також складність формалізації семантичних помилок і логічних суперечностей, які не зводяться до простих правил перевірки. Не менш важливою є нестача універсальних еталонних наборів для перевірки методів, через що більшість авторів працює з окремими кейсами, що ускладнює перенесення результатів. До суб'єктивних причин слід віднести дисциплінарну фрагментацію досліджень, коли фахівці з цифрового врядування, відкритих даних, машинного навчання та інформаційних систем часто працюють у межах власних методологічних традицій і не доводять результати до єдиної міждисциплінарної моделі. Саме тому у науковому полі співіснують, але недостатньо взаємодіють концептуальні схеми якості, алгоритми автоматичної діагностики та прикладні задачі публічного адміністрування.

Розроблений метод інтелектуального оцінювання якості відкритих даних

У межах проведеного дослідження запропоновано математичну модель інтелектуального оцінювання якості відкритих даних, яка відрізняється від наявних підходів інтеграцією багаторівневого аналізу показників якості, адаптивного зважування метрик та автоматизованого формування рекомендацій на основі виявлених дефектів. На відміну від класичних моделей, що обмежуються статичними наборами індикаторів або ізольованими перевірками, запропонований підхід розглядає якість відкритих даних як динамічну функцію стану набору даних, що залежить від сукупності структурних, семантичних та статистичних характеристик.

Нехай відкритий набір даних подано множиною записів $D = \{r_1, r_2, \ldots, r_n\}$, де кожен запис r_i містить набір атрибутів $A = \{a_1, a_2, \ldots, a_m\}$. Для оцінювання якості вводиться вектор метрик $Q = \{q_1, q_2, \ldots, q_k\}$, який відображає різні аспекти якості, зокрема повноту, узгодженість, коректність, унікальність та семантичну валідність. Кожна метрика визначається як функція від даних:

$$q_j = f_j(D), \quad j = 1, ¼, k, \tag{1}$$

де f_j – відповідна функція оцінювання, реалізована у програмній системі через набір правил, статистичних процедур або моделей машинного навчання.

Інтегральний показник якості набору даних визначається як зважена агрегована функція:

$$Q_{\text{int}} = \sum_{j=1}^{k} w_j \cdot q_j, \tag{2}$$

де w_j – вагові коефіцієнти, що відображають значущість окремих метрик. Наукова новизна полягає у тому, що ваги не задаються апріорно, а визначаються адаптивно залежно від контексту використання даних та виявлених дефектів, що формалізується як:

$$w_j = \frac{\varphi_j(D)}{\sum_{l=1}^{k} \varphi_l(D)}, \tag{3}$$

де $\varphi_j(D)$ – функція важливості метрики, яка враховує щільність помилок, варіативність показника та його вплив на аналітичну придатність даних.

Окремо вводиться функція дефектності $\delta(r_i, a_t)$, яка набуває значення 1 у разі виявлення порушення (наприклад, пропущене значення, аномалія або невідповідність формату) та 0 в іншому випадку. Сукупний рівень дефектності набору даних визначається як:

$$\Delta = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^{n} \sum_{t=1}^{m} \delta(r_i, a_t). \tag{4}$$

Цей показник використовується не лише для оцінювання якості, а й як керуючий параметр у модулі генерації рекомендацій.

Особливістю запропонованої моделі є введення функції рекомендацій R, яка відображає перехід від діагностики до корекції:

$$R = \Psi(Q, \Delta, \Theta), \tag{5}$$

де Θ – множина правил та знань, отриманих з аналізу типових помилок, а Ψ – оператор, реалізований як інтелектуальний механізм, що поєднує евристичні правила та шаблони виправлення. Таким чином, на відміну від традиційних моделей, що завершуються етапом оцінювання, запропонований підхід формалізує повний цикл «оцінювання – інтерпретація – рекомендації».

Додатково враховується аспект відтворюваності оцінки, який формалізується через стабільність метрик у часі або при зміні підвибірки даних:

$$S_j = 1 - \left| q_j^{(t)} - q_j^{(t-1)} \right|,$$

що дає змогу враховувати динамічну поведінку якості даних і забезпечує більшу надійність інтегральної оцінки.

Для забезпечення адаптивності оцінювання запропоновано алгоритм динамічного визначення вагових коефіцієнтів метрик якості, який враховує варіативність даних та ступінь їх інформативності. На першому етапі для кожної метрики якості визначається коефіцієнт варіації, що характеризує нестабільність відповідного показника у вибірці. На другому етапі обчислюється інформаційна значущість метрики як обернена функція від її дисперсії, що дає змогу підвищити вагу стабільних і репрезентативних показників. На третьому етапі здійснюється нормалізація вагових коефіцієнтів таким чином, щоб їх сума дорівнювала одиниці. Завдяки цьому ваги не є фіксованими, а автоматично адаптуються до властивостей конкретного набору даних.

Таким чином від статичних і фрагментарних схем оцінювання переходимо до інтегрованої адаптивної моделі, яка поєднує багатовимірну оцінку якості, контекстно-залежне зважування показників, формалізацію дефектності та автоматизовану генерацію рекомендацій, що в сукупності забезпечує підвищення обґрунтованості та практичної придатності аналізу відкритих даних.

Із метою верифікації та експериментальної апробації запропонованої математичної моделі інтелектуального оцінювання якості відкритих даних було розроблено програмний прототип, який реалізує повний цикл оброблення даних – від їх завантаження та попередньої підготовки до багатовимірного оцінювання якості, виявлення дефектів, формування рекомендацій і генерації аналітичного звіту. Побудована система орієнтована на роботу з реальними наборами відкритих даних, зокрема отриманими з державних порталів, що забезпечує практичну релевантність і відповідність умовам експлуатації відкритих даних у публічному секторі.

Архітектурно програмна реалізація побудована за модульним принципом із чітким розмежуванням функціональних підсистем, що забезпечує гнучкість, масштабованість і можливість подальшого розширення (рис. 1).

Базовим елементом системи є модуль завантаження та інтеграції даних, який здійснює імпорт наборів у різних форматах, їх приведення до уніфікованої структури та первинну нормалізацію. На цьому етапі відбувається формування внутрішнього подання даних як табличної структури, що дає змогу забезпечити універсальність подальших процедур аналізу незалежно від джерела або формату вхідної інформації.

Наступним ключовим компонентом є модуль попереднього оброблення, який реалізує очищення даних, виявлення пропущених значень, нормалізацію форматів та базову трансформацію атрибутів. У цьому модулі закладено механізми автоматичного визначення типів даних, що дає змогу адаптивно застосовувати відповідні процедури оброблення для числових, категоріальних та текстових полів. Особливістю реалізації є поєднання детермінованих правил та ста-

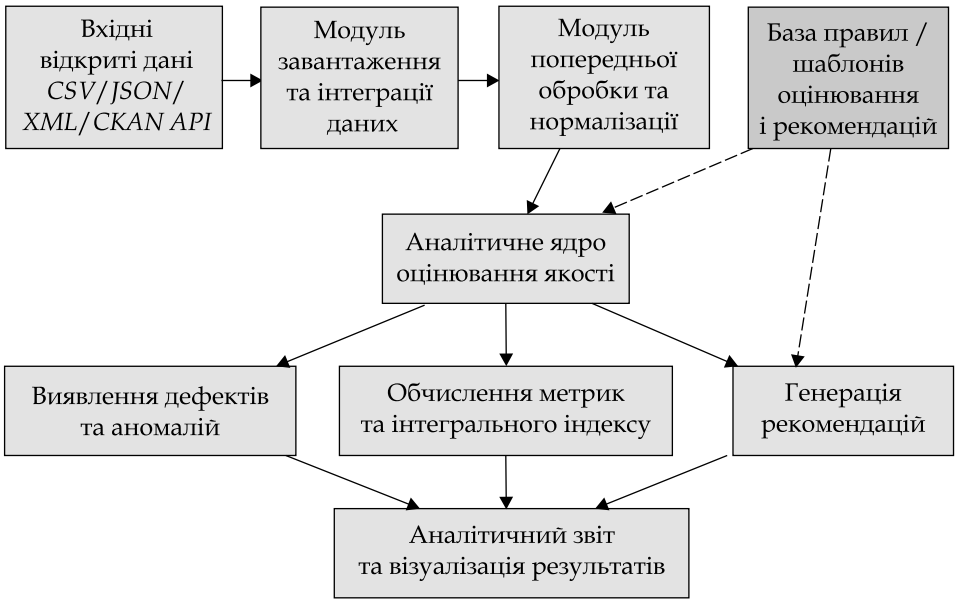


Рис. 1. Архітектура програмної системи інтелектуального оцінювання якості відкритих даних

тистичних методів, що підвищує точність і стійкість оброблення в умовах неоднорідності відкритих даних.

Центральним елементом системи є модуль оцінювання якості, який безпосередньо реалізує запропоновану математичну модель. У цьому модулі здійснюється обчислення набору метрик якості, що відображають різні аспекти стану даних, включно з повнотою, узгодженістю, унікальністю, коректністю та іншими характеристиками. Кожна метрика обчислюється як окрема функція, що застосовується до всього набору даних або його підмножин, після чого відбувається їх агрегування в інтегральний показник якості з урахуванням адаптивно визначених вагових коефіцієнтів. Важливою особливістю реалізації є динамічний характер зважування, який залежить від виявлених дефектів і структури даних, що забезпечує контекстну чутливість оцінювання.

Паралельно функціонує модуль детекції дефектів, який виконує пошук аномалій, пропущених значень, дублікатів, форматних невідповідностей і статистичних відхилень. У рамках цього модуля реалізовано і правилоорієнтовані перевірки, і елементи інтелектуального аналізу, що дає змогу виявляти неочевидні порушення, зокрема аномальні значення або логічні суперечності між атрибутами. Результати роботи цього модуля формують основу для подальшої інтерпретації якості та генерації рекомендацій.

Модуль генерації рекомендацій є ключовим з точки зору практичної цінності системи, оскільки забезпечує перехід від діагностики до підтримки прийняття рішень. Він реалізує механізм відобра-

ження виявлених дефектів у набір коригувальних дій, що формуються на основі заздалегідь визначених правил та шаблонів. При цьому враховується не лише тип дефекту, але й його поширеність, вплив на загальну якість і контекст даних, що дає змогу формувати обґрунтованіші та релевантніші рекомендації.

Завершальним компонентом є модуль формування звітності, який агрегує результати оцінювання, виявлені дефекти та згенеровані рекомендації у структурований аналітичний звіт. Звіт містить і кількісні показники, і текстову інтерпретацію отриманих результатів, що забезпечує зручність сприйняття та можливість використання результатів і для технічного аналізу, і для управлінських рішень. Реалізація цього модуля передбачає автоматизоване формування описових висновків на основі значень метрик, що є важливим кроком до повної автоматизації процесу оцінювання якості даних.

Принцип дії програмної системи ґрунтується на послідовному проходженні даних через зазначені модулі, де кожен наступний етап використовує результати попереднього. Така конвеєрна організація оброблення дає змогу забезпечити цілісність аналізу, узгодженість результатів і мінімізувати втрати інформації. Водночас модульна архітектура забезпечує можливість незалежного вдосконалення окремих компонентів, зокрема інтеграції нових метрик якості, алгоритмів виявлення дефектів або методів генерації рекомендацій.

Апробація методу

Отримані результати експериментальної апробації розробленого методу інтелектуального оцінювання якості відкритих даних демонструють його здатність не лише здійснювати діагностику стану набору даних, але й забезпечувати вимірюваний ефект покращення після застосування автоматизованих процедур корекції та рекомендацій. Узагальнена динаміка зміни інтегрального показника якості наведена на рис. 2, де спостерігається зростання значення з 0,936 до 0,948 після оброблення даних.

Незважаючи на відносно невеликий абсолютний приріст, цей результат має принципове значення, оскільки вихідний рівень якості вже знаходився у високому діапазоні, що ускладнює подальше покращення без інтелектуальних методів. Таким чином, отриманий ефект підтверджує чутливість запропонованої моделі до локальних дефектів та її здатність оптимізувати навіть високоякісні набори даних.

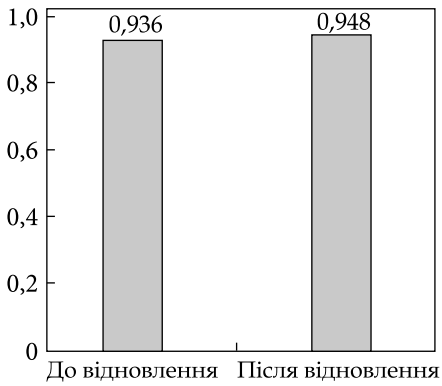


***Рис.* 2.** Динаміка інтегрального показника якості відкритих даних до та після застосування методу

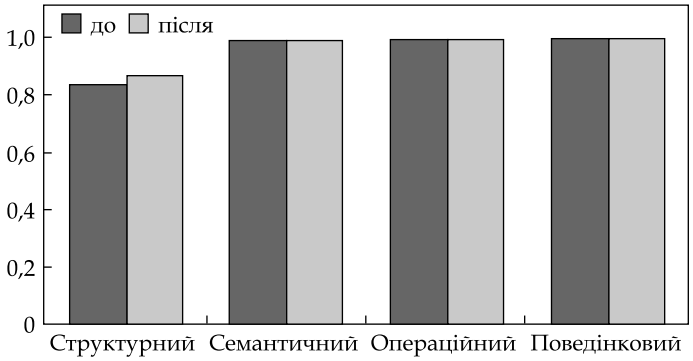


Рис. 3. Порівняння вимірів якості відкритих даних до та після інтелектуальної обробки

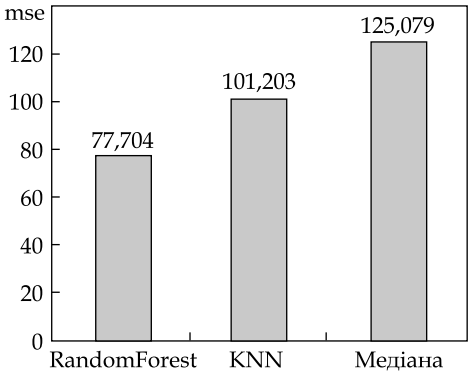


Рис. 4. Порівняння ефективності методів відновлення пропущених значень за метрикою *RMSE*

Більш детальний аналіз здійснено на рівні окремих вимірів якості, результати якого подано на рис. 3.

Зокрема, найбільш суттєве покращення зафіксовано у структурному вимірі, де значення зросло з приблизно 0,84 до 0,87, що свідчить про ефективність процедур нормалізації, заповнення пропусків та усунення форматних невідповідностей. Семантичний та операційний виміри демонструють стабільно високі значення, близькі до одиниці, як до, так і після оброблення, що вказує на їх початкову якість і водночас підтверджує, що модель не вносить деградації у вже коректні компоненти даних. Поведінковий вимір зберігає максимальне значення, що свідчить про відсутність негативного впливу автоматизованих процедур на узгодженість і логіку взаємозв'язків між атрибутами. Така диференційована картина змін підтверджує, що запропонований підхід не є грубим механізмом корекції, а реалізує контекстно-орієнтоване вдосконалення окремих аспектів якості.

Ключовим елементом, який безпосередньо впливає на підвищення якості, є модуль відновлення пропущених значень, ефективність якого оцінено на основі метрики середньоквадратичної помилки (*Root Mean Square Error, RMSE*), що відображено на рис. 4.

Порівняння різних методів відновлення пропущених значень показує, що використання ансамблевого підходу на основі *Random Forest* забезпечує найнижче значення *RMSE* (77,704) порівняно з методом *k*-найближчих сусідів (*k-Nearest Neighbors, KNN*) із *RMSE* 101,203 та медіанним заповненням із *RMSE* 125,079. Це свідчить про здатність мо-

делі враховувати складні нелінійні залежності між атрибутами, що особливо важливо для відкритих даних, які часто характеризуються високою варіативністю та неоднорідністю. Водночас результати демонструють, що прості статистичні методи не забезпечують достатньої точності, що обґрунтовує необхідність використання інтелектуальних алгоритмів у процесах підвищення якості.

Реалізована модель демонструє системну інтеграцію оцінювання, виявлення дефектів і їх усунення, що дає змогу перейти від статичного аналізу до динамічного управління якістю даних. Важливим є те, що всі покращення мають кількісне підтвердження, що відповідає вимогам метрологічної строгості та відтворюваності результатів.

Запропонована модель та методологія і її програмна реалізація можуть розглядатися як оптимальне рішення у контексті задач управління якістю відкритих даних, оскільки поєднують універсальність застосування, адаптивність до структури даних, здатність до автоматичного виявлення та усунення дефектів, а також забезпечують вимірюваний ефект покращення, що є критично важливим для практичного використання у цифрових екосистемах відкритих даних.

У проведеному дослідженні інтегральний показник якості відкритого набору даних зріс з 0,9362 до 0,9477, тобто на 0,0115 пункту, або приблизно на 1,23% від початкового рівня. Найбільш проблемним виявився структурний вимір якості зі значенням 0,8335, тоді як семантичний, операційний і поведінковий виміри мали значення 0,9888, 0,9917 і 0,9947 відповідно. Для задачі виявлення аномалій найкращим алгоритмом став *Isolation Forest*, який за експерименту з 62 штучно внесеними аномаліями забезпечив точність (*precision*) 0,128, повноту (*recall*) 0,306, *F*1-міру 0,181 та загальну точність класифікації 0,943. У задачі відновлення пропущених значень найкращий результат показав *Random Forest* із *RMSE* 77,704, що є кращим за *KNN* із *RMSE* 101,203 і медіанне заповнення з *RMSE* 125,079. Таким чином, зменшення похибки становило 23,2% відносно *KNN* і 37,9% відносно медіанного підходу.

Rahal та колеги запропонували якісно близький за ідеєю підхід, у якому якість даних оцінюється до етапу побудови прогнозної моделі, а вибір якісніших підмножин даних приводить до поліпшення результатів машинного навчання [14]. У їхньому дослідженні для набору *G*1 найкращий кластер забезпечив *RMSE* 0,08 і R^2 = 0,95, тоді як найгірший кластер мав *RMSE* 0,71 і R^2 = 0,03; отже, різниця між кластерами становила 0,63 за *RMSE*, а похибка у найкращому кластері була нижчою приблизно у 8,9 раза. Для набору *G*2 найкращий кластер мав *RMSE* 0,598 при R^2 = 0,855, а найгірший *RMSE* 1,122 при R^2 = = 0,282, тобто зниження *RMSE* становило 46,7%. Для набору *G*3 найкращий кластер продемонстрував *RMSE* 0,497 при R^2 = 0,942, а найгірший *RMSE* 2,180 при R^2 = 0,344, тобто похибка зменшувалася на 77,2 %. Порівняно з цими результатами, у даному дослідженні також зафіксовано чіткий виграш від інтелектуального добору та обробки

даних: *Random Forest* знизив похибку відновлення пропущених значень за метрикою *RMSE* на 23,2 % відносно *KNN* і на 37,9 % відносно медіанного заповнення, а підсумковий інтегральний показник якості збільшився на 1,23 %. Таким чином, в обох роботах підтверджується одна й та сама технічна закономірність: попередня оцінка й корекція якості даних статистично покращують результативність подальшої обробки, хоча у роботі *Rahal* та колег ефект оцінювався через точність прогнозування, а в цьому дослідженні — через інтегральний показник якості, *F*1-міру виявлення аномалій та *RMSE* відновлення пропущених значень.

Karamanou та співавтори досліджували якість динамічних відкритих урядових даних і показали, що 20,16% спостережень у їхньому наборі були відсутніми, а у 50 % сенсорів частка пропусків лежала в інтервалі 15,5—33,43 % [7]. У цьому дослідженні загальна частка пропусків становила 21,05 %, тобто практично збігалася з рівнем, зафіксованим у роботі *Karamanou* та колег, а різниця становила лише 0,89 відсоткового пункту. Водночас у роботі [7] середній відсоток аномалій на сенсор за методом *flow-speed correlation* досягав 71,1%, а для дев'яти найкращих сенсорів *STL*-декомпозиція виявила 12,6% аномалій, тоді як *Isolation Forest* — 11,6%. У цьому дослідженні застосування *Isolation Forest* до експерименту з контрольовано внесеними аномаліями дало *F*1 = 0,181, *precision* = 0,128 і *recall* = 0,306. Пряме числове зіставлення відсотка аномалій у [7] і 1-міри у цьому дослідженні не є тотожним, оскільки у першому випадку йдеться про частку аномальних записів у природному потоці сенсорних даних, а в другому — про точність відтворення заздалегідь штучно внесених дефектів у табличному наборі адміністративних послуг. Проте технічно обидві роботи демонструють спільну рису: аномалії становлять не поодинокий, а системний клас дефектів, а *Isolation Forest* виявляється працездатним інструментом для їх виявлення в умовах неоднорідних відкритих даних.

Pekar і *Jozsa* аналізували вплив цілісності даних на якість машинного виявлення мережевих аномалій і показали, що *Random Forest* зберігав дуже високі, а в окремі дні — практично ідеальні показники бінарної та багатокласової класифікації [15]. Зокрема, для низки очищених наборів даних моделі демонстрували ідеальні або майже ідеальні результати на вівторок, середу та п'ятницю, а для окремих сценаріїв бінарної класифікації спостерігалася безпомилкова ідентифікація безпечних потоків без хибнопозитивних спрацювань. На відміну від цього, у цьому дослідженні задача виявлення аномалій була суттєво складнішою з точки зору дисбалансу класів і слабкої вираженості дефектів: за 2993 записів було штучно внесено лише 62 аномалії, тобто близько 2,07% вибірки, а найкращий алгоритм досяг *F*1 = 0,181 при *recall* = 0,306. Тому різниця між майже ідеальними результатами у [15] та скромнішою *F*1-мірою у даному дослідженні свідчить не про нижчу якість моделі, а про вищу складність виявлення аномалій у

слабоструктурованих адміністративних даних, де дефекти часто мають не класово-виражену, а контекстно-умовну природу. Разом із тим обидва дослідження узгоджено показують, що навіть за наявності проблем цілісності даних ансамблеві методи залишаються найстійкішими до шуму та неоднорідності середовища.

Alexakis та колеги не подають експерименту з єдиним еталонним набором даних, тому пряме зіставлення за метриками типу *RMSE* або *F*1 у цьому випадку обмежене [4]. Водночас їхній огляд є важливим для інтерпретації отриманих результатів, оскільки показує, що точність є найуживанішою характеристикою якості даних і трапляється у 81% проаналізованих праць, тоді як базова тріада точності, повноти та узгодженості зустрічається більш ніж у половині досліджень. У цьому контексті результати цього дослідження добре відповідають сучасним тенденціям: найбільш проблемним виявився саме структурний вимір якості з оцінкою 0,8335, що безпосередньо пов'язано з повнотою, форматною коректністю та узгодженістю, тоді як семантичний та операційний виміри перевищили 0,98. Отже, отримані результати не лише мають власну кількісну значущість, а й добре узгоджуються з сучасним уявленням про те, що найбільший виграш у задачах управління якістю даних забезпечує саме робота з повнотою, точністю та узгодженістю як базовими і найчутливішими компонентами якості.

Це дає підстави вважати, що для відкритих адміністративних даних, де дефекти мають змішану структурно-семантичну природу, практична цінність методу полягає не у досягненні формально ідеальних показників класифікації, а у стабільному покращенні якості набору та у формуванні придатної до впровадження технології діагностики, відновлення й рекомендаційної підтримки.

Висновки та перспективи подальшого дослідження

У результаті проведеного дослідження розроблено метод інтелектуального оцінювання якості відкритих даних, який забезпечує комплексне врахування структурних, семантичних, операційних та поведінкових характеристик даних у межах єдиного формалізованого підходу. Запропонована математична модель дає змогу інтегрувати окремі показники якості в узагальнений інтегральний індекс, що забезпечує більш об'єктивне та відтворюване оцінювання.

Реалізована програмна система підтвердила ефективність запропонованого підходу, продемонструвавши підвищення інтегрального показника якості даних після застосування методів автоматизованого очищення та відновлення. Зокрема, зафіксовано зростання інтегрального показника якості, що свідчить про узгоджене покращення різних аспектів даних. Аналіз окремих вимірів показав найбільш суттєве підвищення структурної узгодженості, що вказує на ефективність застосованих процедур нормалізації та оброблення пропусків.

Окрему увагу приділено оцінюванню ефективності методів відновлення відсутніх значень, де встановлено перевагу ансамблевих підходів, зокрема *Random Forest*, що забезпечив мінімальне значення похибки порівняно з альтернативними методами. Це підтверджує доцільність використання адаптивних моделей машинного навчання для задач підвищення якості відкритих даних.

Отримані результати демонструють, що запропонований метод дає змогу перейти від фрагментарного оцінювання якості до інтегрованого інтелектуального аналізу з автоматизованим формуванням рекомендацій. Це забезпечує не лише підвищення якості даних, але й створює основу для побудови систем підтримки прийняття рішень на базі відкритих даних.

ПОВІДОМЛЕННЯ

Внесок автора. *Стаття є одноосібною. Моторнюк С.О. виконав усі етапи дослідження відповідно до ролей CRediT: концептуалізація; методологія; розроблення математичної моделі; програмна реалізація; валідація; формальний аналіз; проведення експериментів; оброблення та інтерпретація даних; візуалізація результатів; підготовка початкового тексту рукопису; редагування та остаточне затвердження тексту статті.*

Застосування штучного інтелекту та інших інструментів. *Під час підготовки рукопису використовувалися допоміжні цифрові інструменти, зокрема інструменти на основі штучного інтелекту, для мовного редагування, поліпшення стилістики тексту, структурування окремих формулювань та перекладу фрагментів. Зазначені інструменти не використовувалися як самостійне джерело наукових результатів, не здійснювали інтерпретацію експериментальних даних і не приймали дослідницьких рішень. Усі наукові положення, математичні моделі, результати експериментів, висновки та бібліографічні посилання були перевірені й затверджені автором. Автор несе повну відповідальність за зміст статті.*

Конфлікт інтересів. *Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів, який міг би вплинути на результати дослідження, їх інтерпретацію або представлення у статті.*

Фінансування. *Дослідження виконано без залучення грантової, спонсорської або іншої зовнішньої фінансової підтримки.*

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Carvalho A.M., et al. Data Quality: Revisiting dimensions towards new framework development. *Procedia Computer Science*, 2025, Vol. 253, 247–256. https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.088
2. Miller R., et al. A framework for current and new data quality dimensions: An overview. *Data*, 2024, Vol. 9 (12), Article 151. https://doi.org/10.3390/data9120151
3. Al-Toq R., Almaslukh A. DQMAF – Data Quality Modeling and Assessment Framework. *Information*, 2025, Vol. 16 (10), Article 911. https://doi.org/10.3390/info16100911
4. Alexakis T., et al. Evaluating data quality: Comparative insights on standards, methodologies, and modern software tools. *Electronics*, 2025, Vol. 14 (15), Article 3038. https://doi.org/10.3390/electronics14153038
5. González-Vidal A., Ramallo-González A.P., Skarmeta A.F. Intrinsic and extrinsic quality of data for open data repositories. *ICT Express,* 2022, Vol. 8 (3), 328–333. https://doi.org/10.1016/j.icte.2022.06.001
6. Martinez-Gil J. Framework to automatically determine the quality of open data catalogs. *Expert Systems with Applications*, 2025, Vol. 289, Article 128379. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128379

7. Karamanou A., et al. Exploring the quality of dynamic open government data using statistical and machine learning methods. *Sensors*, 2022, Vol 22 (24), Article 9684. https://doi.org/10.3390/s22249684
8. Zong H., Wang Y. Impact mechanism of government public data openness and digital financial development on corporate information reliability. *International Review of Economics & Finance*, 2025, Vol. 103, Article 104495. https://doi.org/10.1016/j.iref.2025.104495
9. Gabay H., Reychav I., Jonathan G.M. Transformative shift: Digital evolution in Israeli public sector agencies during an emergency period. *Procedia Computer Science*, 2025, Vol. 256, 496–503. https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.145
10. Jonathan G.M., Perjons E., Rusu L. Digital transformation-driven decentralisation of public governance. *Procedia Computer Science,* 2024, Vol. 239, 1220–1229. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.290
11. Jiao W., Zhang C., Wang Y. The impact of digital government construction on common prosperity – using data collected from 293 prefecture-level cities in China over the 2016–2022 period. *International Review of Economics & Finance*, 2025, Vol. 102, Article 104353. https://doi.org/10.1016/j.iref.2025.104353
12. Zhang Y., Li Y. The impact of artificial intelligence on government digital service capacity. *International Review of Economics & Finance,* 2025, Vol. 102, Article 104374. https://doi.org/10.1016/j.iref.2025.104374
13. Dani pro nadani administratyvni posluhy. (n.d.). Portal vidkrytykh danykh. URL: https://data.gov.ua/dataset/e1fd3119-3df6-43ce-8e5b-41bcc79dcb02 [Accessed 10 May. 2026]
14. Rahal M., et al. Enhancing machine learning performance through intelligent data quality assessment: An unsupervised data-centric framework. *Heliyon*, 2025, Vol. 11 (4), Article e42777. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42777
15. Pekar A., Jozsa R. Evaluating ML-based anomaly detection across datasets of varied integrity: A case study. *Computer Networks*, 2024, Vol. 251, Article 110617. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110617

Отримано/Received 15.07.2026
Прийнято/Accepted 12.09.2026
Опубліковано/Published 23.10.2026

S.O. MOTORNIUK, PhD Student,
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics,
9A, Nauky ave., Kharkiv, 61165, Ukraine
https://orcid.org/0009-0001-7695-5415
serhii891@proton.me

METHOD OF INTELLIGENT ASSESSMENT
OF THE QUALITY OF OPEN DATA WITH AUTOMATED
GENERATION OF RECOMMENDATIONS AND REPORTS

Introduction. The rapid growth of open data published by public authorities, research institutions and business organizations increases the need for reliable mechanisms of data quality assessment. Although open data are formally available for reuse, their practical analytical value is often limited by missing values, structural inconsistencies, format errors, semantic contradictions, duplicates and anomalous observations. These defects reduce the reliability of decision-making, complicate integration into digital platforms and weaken the effectiveness of intelligent services based on open datasets. Existing approaches to data quality assessment are often fragmented, static and mainly descriptive. They usually focus on isolated metrics and do not provide a complete automated cycle that includes defect detection, quality improvement recommendations and analytical reporting. Therefore, the development of intelligent methods capable of combining formal validation rules, statistical procedures and machine learning algorithms is an urgent scientific and practical task.

The purpose of the paper is to develop a method for intelligent assessment of open data quality with automated generation of recommendations and analytical reports. The proposed method is aimed at increasing the analytical usability and practical value of open datasets by integrating multidimensional quality metrics, adaptive weighting, anomaly detection, missing value imputation and interpretable reporting within a single methodological and software framework.

Methods. The study proposes a mathematical model for intelligent open data quality assessment. The model represents a dataset as a set of records and attributes and evaluates it through a vector of quality metrics, including completeness, consistency, correctness, uniqueness and semantic validity. Each metric is calculated using a combination of rule-based validation, statistical analysis and machine learning techniques. A key feature of the approach is the construction of an integral quality indicator based on adaptive metric weights. Unlike traditional models with fixed weights, the proposed method adjusts the importance of each metric according to the detected defects, variability of indicators and their influence on the analytical suitability of the dataset. The model also includes a defect function for identifying missing values, anomalies and format inconsistencies, as well as a recommendation function that transforms diagnostic results into corrective actions. To verify the proposed method, a modular software prototype was developed. It supports data loading, preprocessing, quality assessment, defect detection, recommendation generation and automated analytical reporting.

Results. Experimental validation confirmed the effectiveness of the proposed approach. After applying the developed method, the integral quality indicator of the open dataset increased from 0.9362 to 0.9477, which corresponds to an improvement of approximately 1.23% compared with the initial level. This result is significant because the original dataset already had a relatively high quality score, making further improvement difficult without intelligent processing. The most noticeable improvement was observed in the structural quality dimension, which increased from approximately 0.84 to 0.87 due to normalization, missing value processing and correction of format inconsistencies. Semantic, operational and behavioral dimensions remained close to one, indicating that the proposed method improved problematic components without degrading already correct data aspects. In anomaly detection, Isolation Forest showed the best result under the experimental conditions with injected anomalies, achieving an overall classification accuracy of 0.943. In the missing value imputation task, the Random Forest method achieved the lowest Root Mean Square Error (RMSE) value of 77.704, outperforming the k-Nearest Neighbors (KNN) method with RMSE 101.203 and median imputation with RMSE 125.079. Thus, Random Forest reduced the imputation error by 23.2% compared with KNN and by 37.9% compared with the median approach.

Conclusions. The proposed method enables a transition from fragmented and declarative data quality assessment to an integrated intelligent analysis of open datasets. Its scientific novelty lies in combining multidimensional quality assessment, adaptive weighting of metrics, formalized defect detection and automated recommendation generation. The developed software implementation confirms the practical applicability of the method and demonstrates that intelligent processing can provide measurable improvements even for datasets with initially high quality. The results prove the feasibility of using machine learning algorithms, especially ensemble models, for improving open data quality. The proposed approach can be used as a basis for decision support systems, open data portals and digital governance platforms where the reliability, completeness and analytical usability of data are critical.

Keywords: *open data, data quality, artificial intelligence, quality assessment, anomaly detection, data imputation, recommender systems, analytical reports, CKAN, machine learning.*

COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION
ІКОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.099
UDC 004.92

K.K. DUKHNOVSKA, PhD (Engineering), Associate Professor,
Department of Software Systems and Technologies
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
24, Bohdana Havrylyshyna St., Kyiv, 02000, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-4539-159X
duchnov@ukr.net
T.I. HOLUB, Student,
Department of Software Systems and Technologies
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
24, Bohdana Havrylyshyna St., Kyiv, 02000, Ukraine
https://orcid.org/0009-0004-1178-7264
tetiana_holub@knu.ua

AI IMAGE DETECTION USING AN ENSEMBLE OF EFFICIENTNET, RESNET, AND VISION TRANSFORMER

Modern generative models, such as GANs and diffusion models, produce highly realistic synthetic images that are virtually indistinguishable from authentic photographs, posing significant risks in forensics, journalism and data verification. To address the need for a fast and accessible detection tool, this paper proposes an ensemble approach combining EfficientNet-B0, ResNet-50 and ViT-B/16 architectures. Fine-tuned via transfer learning on the CIFAKE and AI-vs-Real datasets, the ensemble leverages CNNs for local texture anomaly detection and the Vision Transformer for global patch dependencies. Evaluated on a 2,000-image test set using soft voting, the model achieved an accuracy of 89.60%, precision of 92.94%, recall of 85.70%, an F1-score of 89.17% and an AUC-ROC of 0.9641. The notably high precision minimizes false accusations of tampering. The system is deployed as a scalable web application utilizing a microservices architecture (React, Node.js, FastAPI, PostgreSQL, Docker).

Keywords: *synthetic image detection, deepfake detection, ensemble learning, EfficientNet, Vision Transformer, transfer learning, CIFAKE.*

Cite: Dukhnovska K.K., Holub T.I. AI Image Detection Using an Ensemble of Efficientnet, Resnet, and Vision Transformer. *Information Technologies and Systems*. 4 (10). 2026. 99—111. https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.099

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

Introduction

Synthetic images generated by neural networks no longer exhibit characteristic defects. Modern generative adversarial networks and diffusion models reproduce faces, scenes and objects with a level of quality that prevents even an experienced observer from identifying the forgery. Forged photographs have already been introduced into legal proceedings, electoral campaigns and training datasets of other systems.

The scale of the problem has shifted with the advent of diffusion models. While early generative adversarial networks left characteristic artifacts such as deformed ears, an incorrect number of fingers and blurred background details, systems like Stable Diffusion, Midjourney and DALL-E have eliminated most of them. Detectors trained to recognize these legacy features fail when applied to novel content.

The task of synthetic image detection is formulated as a binary classification problem where each input image is categorized as either real or generated. Existing approaches are generally divided into two main directions. Convolutional neural network methods capture local textural artifacts but are constrained by the size of their receptive field. Transformer architectures model the global structure of the image, although they require more substantial computational resources.

An ensemble combination of these architectures compensates for their individual weaknesses. EfficientNet-B0 adeptly detects low-frequency textural anomalies. ResNet-50 provides robust generalization due to its residual connections. The ViT-B/16 model analyzes the patch structure on a global scale. Together, these three networks cover a significantly broader spectrum of forgery features than each model operating independently.

Problem Statement

The rapid advancement of generative models — particularly GANs and diffusion architectures — has outpaced the development of reliable detection methods. Existing detectors are predominantly trained and evaluated on narrow, homogeneous datasets, limiting their generalization to novel generative models and real-world conditions such as image compression or resizing. Furthermore, the majority of current approaches focus on facial deepfake video content, leaving the domain of general-purpose synthetic images – objects, scenes, and graphics — underexplored. The absence of accessible, ready-to-deploy detection tools compounds the problem for end users. This study addresses the need for a robust, ensemble-based classifier capable of operating across heterogeneous image sources and deployable as a practical web application.

Literature Review

An analysis of contemporary scientific literature on the problem of synthetic image detection demonstrates a conceptual shift from the exclusive

use of convolutional neural networks to hybrid and ensemble approaches based on attention mechanisms.

The authors of the study [1] systematized CNN-based methods for digital image forensics, distinguishing between four types of manipulations: copy-move, image splicing, object removal and GAN generation. On the FaceForensics++ dataset, XceptionNet and InceptionNet demonstrated the highest accuracy among the evaluated architectures. Early forensic techniques predominantly relied on frequency-domain features, utilizing the discrete cosine transform and wavelet transforms. While these features effectively detected specific types of manipulations, they failed to generalize to novel ones. Data-driven neural network approaches partially mitigated this issue by learning to detect a broader spectrum of artifacts; however, this came at the cost of reduced accuracy when encountering shifts in the input data distribution. The authors highlight a systemic limitation: the training and testing of most reviewed methods are conducted on the identical data distribution. Although ResNet and EfficientNet exhibit greater robustness to such shifts due to residual connections and compound scaling, their generalization to diffusion models — which were only emerging at the time of publication — remained untested. Consequently, the challenge of developing detectors capable of identifying images from heterogeneous sources without the need for additional training remains unresolved [1].

In study [2], the specialized CIFAKE dataset is presented, comprising 120,000 images designed for binary classification tasks. Its authentic subset is formed from 60,000 images from the CIFAR-10 dataset, which covers ten distinct classes including airplanes, automobiles and birds. Conversely, the synthetic segment includes 60,000 images generated using the Stable Diffusion 1.4 model. The fixed resolution of 32×32 pixels distinguishes CIFAKE from similar datasets focused on facial recognition, ensuring high computational speed and enabling rapid model training even with limited hardware resources. The generation process for the artificial content was based on a 50-step reverse diffusion process utilizing text prompts for each semantic class; notably, additional thematic modifiers were applied to increase the diversity of the airplane class sample.

The authors conducted a comparative analysis of 36 convolutional neural network topologies, identifying an optimal configuration of two layers with 128 filters each, which achieved an accuracy of 92.98% and an F1-score of 0.936. A key scientific finding of the study is that the classifier relies not on the features of the central object, but on the background artifacts of the generation process. This assertion was verified using the Grad-CAM method: activation heatmaps concentrate on peripheral zones and background textural anomalies rather than on the target object. The CIFAKE dataset has been published in open access, leading to its extensive application in subsequent research. However, the study did not investigate the generalization capability of the developed methods to other generative architectures, nor did it explore the effectiveness of ensemble approaches and transformer-based models.

The authors of the study [3] compared MesoNet, XceptionNet, and DenseNet, proposing a modified Dense CNN architecture with densely connected convolutional blocks. This architecture demonstrated superior precision and F1-scores compared to MesoNet on the FaceForensics++ dataset.

Dense connections between the layers enable each layer to receive feature maps from all preceding layers. This mitigates the vanishing gradient problem and enhances feature reuse during the training process. Furthermore, the study investigated the impact of video compression: transitioning from an uncompressed format to a highly compressed one significantly degraded the accuracy of all evaluated methods — a result consistent with the findings in [1].

However, the scope of the study is limited to facial video datasets. The efficacy of the Dense CNN for general-purpose static synthetic images — such as objects, landscapes and graphics — was not evaluated. Consequently, the applicability of this approach beyond the domain of deepfake videos, as well as its robustness when encountering generative models absent from the training set, remain unresolved.

The authors of [4] investigated the performance gap of deepfake detectors between laboratory and real-world conditions. The vast majority of existing systems exhibit acceptable accuracy on academic datasets but experience significant degradation when encountering compressed or scaled images, which are typical of social media platforms.

The authors introduced a standard set of transformations: JPEG compression, resizing, Gaussian blur, cropping and their combinations. Evaluating XceptionNet and EfficientNet-B4 against these transformations revealed an average drop in AUC of 15–30 percentage points, even under moderate compression with a quality factor of 70.

The authors concluded that data augmentation during training is not merely an option, but a necessary prerequisite for robustness. Architectural solutions alone are insufficient to achieve this. However, the automatic selection of a classification threshold based on environmental conditions, as well as ensemble methods designed to compensate for the vulnerabilities of individual models under specific circumstances, were not addressed in the study.

The study [5] is devoted to the development of FG-TEFusionNet, a system that combines an inter-frame temporal module (an RNN with an SENet attention mechanism) and a spatial module (EfficientNet integrated with a Gram texture module). The final decision is determined through a voting mechanism between them. Preprocessing involves IMTCNN for face extraction and a diffusion model for artifact removal.

The architecture was evaluated on four subsets of the FaceForensics++ and Celeb-DF datasets. A distinct advantage of the proposed method is its robustness against adversarial attacks: the authors utilized I-FGSM to generate adversarial examples and applied adversarial training for defense. The vast majority of existing deepfake detectors overlook this aspect.

Acting as a spatial feature extractor, EfficientNet demonstrated competitive results, which corroborates the selection of this architecture in the present study as well. However, questions concerning the effectiveness of the approach for static synthetic images outside the context of facial videos, along with the viability of employing an ensemble lacking a temporal component, remained unanswered.

In study [6], DiffCoR is proposed as a fundamentally different approach to detection. Instead of feature classification, the method utilizes a diffusion model for reconstruction: the image is corrupted with noise and then restored, after which it is compared to the original based on correlation characteristics. Authentic photographs are reconstructed less accurately due to the unique noise characteristics of camera sensors — synthetic images lack such properties.

Among the baseline approaches used for comparison, Tran et al. evaluated EfficientNet-B0 and ViT in a configuration similar to the one employed in the present study. On specific subtypes of synthetic images, both models were outperformed by DiffCoR in terms of AUC. This underscores the limitations of approaches relying solely on feature classification, while simultaneously confirming that EfficientNet-B0 and ViT serve as viable foundational components.

However, DiffCoR necessitates executing the diffusion process for every single input image. This is computationally expensive and significantly hinders its application in real-time scenarios. The potential of integrating DiffCoR with classification-based approaches to achieve a more optimal balance between accuracy and inference speed was not addressed in the study.

The authors of [7] developed an eight-layer CNN to detect AI-generated images. A key distinction from the majority of studies is its evaluation across three diverse domains: the CIFAKE dataset comprising 32 by 32 pixel diffusion images, a Midjourney v6 dataset at a 64 by 64 resolution, and a proprietary Sentinel-2 satellite imagery dataset generated via StyleGANv3 at a 128 by 128 resolution.

On the CIFAKE dataset, the model achieved an accuracy of 96.60%, on Midjourney v6 it reached 99.94%, and on Sentinel-2 it attained 98.69%. To evaluate the quality of the synthetic satellite images, the authors employed the FID metric, noting that a value below 25 at the conclusion of training indicates a sufficient level of realism within the synthetic sample. The application of the Grad-CAM++ method corroborated the findings of [2], confirming that activations are concentrated on the background and peripheral artifacts rather than on the primary object.

The study [7] demonstrates that a compact CNN with a limited number of parameters can yield competitive results. Nevertheless, all three experiments were conducted using entirely separate models. The potential of integrating CNNs with transformer-based approaches in an ensemble framework, alongside the issue of stability during cross-domain transfer, remained unexplored.

In study [8], a two-stream system based on EfficientNet-B0 and ViT was developed. A fundamental distinction from a conventional ensemble is that both networks process not only RGB images but also noise maps generated by Steganalysis Rich Model filters. Feature fusion is achieved through an Efficient-to-Former block, where the local features extracted by EfficientNet-B0 are combined with the global dependencies of the ViT via cross-attention.

The authors explicitly justify their selection of EfficientNet-B0 over more advanced versions of the family, noting that it provides a superior balance between accuracy and computational complexity compared to ResNet-50 and MobileNetV3. The system achieved accuracy scores of 0.845, 0.999 and 0.815 on the FaceForensics, Celeb-DF-V2 and Wild Data datasets, respectively. Notably, on the Wild Data dataset, which consists of images sourced from the Internet, the proposed framework outperformed both baseline approaches.

However, the system is specifically tailored for facial video analysis. Evaluation on general synthetic image datasets, namely CIFAKE and AI-vs-Real, was not performed. Consequently, whether the advantage of the noise stream is maintained beyond the domain of video content remains an open question.

In study [9], the authors developed the Patch-Based Vision Transformer for Identifying Synthetic Media, denoted as PV-ISM, which is a ViT architecture modified specifically for the detection task. Instead of a standard sigmoid output, PV-ISM generates two logits, allowing for more flexible threshold tuning. For regularization purposes, dense layers and dropout were introduced between the transformer blocks. Notably, the model was trained entirely from scratch without relying on pre-trained weights.

Following a comprehensive hyperparameter search encompassing patch size, image resolution, the number of blocks and the number of epochs, PV-ISM achieved an accuracy of 96.60% and an F1-score of 96.61% on the CIFAKE dataset. Under identical conditions, a baseline ResNet-50 model reached an accuracy of 93.32%. Additional experiments conducted on the RVF-10K dataset, comprising facial images from StyleGAN and FFHQ and the Art Images dataset yielded accuracies of 81.70% and 93.16%, respectively. This demonstrates the model's capacity to adapt to diverse domains without the need for retraining.

However, the authors of [9] did not explore an ensemble combination of PV-ISM with CNN architectures. Furthermore, the model's performance when evaluated on combined datasets — such as integrating CIFAKE and AI-vs-Real — was not investigated.

Study [10] describes a deepfake image detection competition organized at the ICIAP 2021 conference. Task I required the detection of forgeries subjected to various post-processing attacks, specifically JPEG compression, resizing, blurring, cropping and combinations thereof. The dataset was compiled using authentic images from CelebA and FFHQ,

alongside synthetic images produced by six distinct GAN architectures: StarGAN, StarGAN-v2, StyleGAN, StyleGAN2, AttGAN, and GDWCT.

The outcomes proved to be highly revealing. The winning team, VisionLabs, utilized EfficientNet-B3 pre-trained on ImageNet weights, achieving an accuracy of 93.61% in the presence of these attacks. The runner-up employed EfficientNet-B5, attaining an AUC of 0.9674. The third-place solution featured a hybrid model combining EfficientNet and CrossViT. Notably, all three top positions were secured by solutions based on the EfficientNet family, with the best-performing approaches integrating EfficientNet with transformer elements.

However, the authors of [10] did not aim to compare EfficientNet with ResNet and ViT within an equal-weight ensemble framework. Furthermore, the performance of such a combination on general synthetic image datasets, outside the domain of facial imagery, was not analyzed in the study.

Studies [3, 5, 8, 10] evaluate detectors on videos or facial images. The classification of general-purpose synthetic images — specifically objects and scenes, such as those in the CIFAKE and AI-vs-Real datasets — remains under-investigated. Studies [2, 7, 9] focus exclusively on individual architectures. An ensemble combination of EfficientNet-B0, ResNet-50, and ViT-B/16 applied to general datasets utilizing an equal-weight soft voting configuration has not been examined by any of the analyzed works. Furthermore, the authors of [4] demonstrated that the vast majority of detectors degrade under real-world conditions and the systems themselves are rarely implemented as accessible applications for end users.

The Purpose of the Paper

The objective is to develop an ensemble software system for synthetic image detection based on EfficientNet-B0, ResNet-50 and ViT-B/16, which provides greater classification stability compared to each model operating independently.

To achieve this objective, the following tasks were formulated and accomplished:

- Train EfficientNet-B0, ResNet-50 and ViT-B/16 using a transfer learning approach on the CIFAKE and AI-vs-Real datasets, and construct an ensemble by averaging the predicted probabilities.
- Evaluate the ensemble using the Accuracy, Precision, Recall, F1-score and AUC-ROC metrics and compare the obtained performance with the results of the individual models.

Materials and Methods

The research was conducted using two open-source datasets, ensuring the representativeness of the sample. The CIFAKE dataset comprises 120,000 images with a spatial resolution of 32×32 pixels, of which 60,000 are authentic images from the CIFAR-10 database and the remaining 60,000 are synthetic images generated using the Stable Diffusion 1.4 dif-

fusion model, uniformly distributed across ten semantic classes [2]. The AI-vs-Real (Kaggle) dataset contains higher-resolution images and encompasses a broader spectrum of generative stylistic features. The integration of these datasets enabled the training of the models on both low-resolution baseline images and highly realistic samples with complex structures.

Three complementary neural network architectures were utilized as baseline classifiers. The EfficientNet-B0 model implements the compound scaling paradigm (simultaneous proportional scaling of network depth, width and resolution), which provides higher classification accuracy with fewer parameters compared to predecessor architectures; the feasibility of its application is corroborated by the results of study [8]. The ResNet-50 architecture mitigates the vanishing gradient problem through the use of residual connections between layers, demonstrating a high generalization capacity on heterogeneous datasets [1]. The Vision Transformer (ViT-B/16) model decomposes the input image into 16×16 pixel patches and models the global contextual dependencies among them via a self-attention mechanism — an approach that has proven effective on the CIFAKE dataset in study [9].

The models were trained utilizing a transfer learning approach with pre-initialized weights derived from the ImageNet dataset. In the initial stage, the base feature extraction layers were frozen and only the classification blocks were subjected to optimization. In the second stage, the upper layers were unfrozen to perform the fine-tuning procedure. The original classification heads of the models were replaced with fully connected linear layers for binary classification featuring a sigmoid activation function.

The training process was implemented using the AdamW optimization algorithm and the CosineAnnealingLR learning rate scheduler. Binary Cross-Entropy was selected as the loss function. Computational experiments were conducted in the Google Colab cloud environment using the PyTorch framework and the torchvision library. To enhance the robustness of the detectors, in accordance with the recommendations of study [4], data augmentation was applied, encompassing horizontal flipping, random cropping and standardized normalization using ImageNet parameters.

The final decision of the system is formed based on an ensemble method via averaging the predicted probabilities (soft voting) from all three equally weighted models. Classification is executed utilizing a threshold value of 0.5. The applied approach allows for the effective aggregation of the local sensitivity to textural artifacts characteristic of convolutional neural networks (EfficientNet-B0 and ResNet-50) with the global spatial analysis inherent to the ViT-B/16 architecture.

The evaluation of the developed method's effectiveness was conducted on a balanced test set consisting of 2,000 images (1,000 authentic and 1,000 synthetic), utilizing the following metrics: Accuracy, Precision, Recall, F1-score and the AUC-ROC.

The software implementation of the system was executed as a multi-tier web application with a microservices architecture, comprising four key abstractions:

- A client-side frontend based on React/TypeScript using the Nginx web server (port 8080);
- An API gateway on the Node.js/Express platform implementing JWT authentication and a caching mechanism based on the SHA-256 hash function;
- A machine learning model inference module utilizing Python/FastAPI;
- A PostgreSQL 16 relational database management system.

Results

Based on the results of the experimental evaluation of the three baseline neural network architectures and their ensemble on an independent test set of 2,000 images, the proposed comprehensive approach demonstrated the highest performance.

An analysis of the overall metrics (Table 1) reveals that the ensemble achieved the highest general accuracy of 89.60%, outperforming the best individual model, ResNet-50, which yielded an accuracy of 88.35%. The precision of the developed system reached 92.94%, demonstrating the high reliability of its positive predictions and the minimization of false labeling of authentic photographs. In terms of recall, the ensemble model identified 85.70% of all synthetic images, ensuring an optimal balance of metrics with an F1-score of 89.17%. The AUC-ROC for the ensemble was 96.41%, confirming its exceptional predictive capability. Among the baseline classifiers, the ResNet-50 architecture proved to be the most effective, followed by the ViT-B/16 transformer with an accuracy of 86.90%, whereas EfficientNet-B0 exhibited the weakest results on this dataset with an accuracy of 84.85%.

A detailed analysis of the confusion matrices reveals the specific nature of the misclassifications (Fig. 1). The ensembling approach significantly reduced the number of false-positive predictions: only 65 instances of authentic images being mistakenly labeled as synthetic were recorded, whereas this figure was 83 for ResNet-50, 98 for ViT-B/16 and 118 for EfficientNet-B0. Owing to this reduction in the error rate, the integrated

Table 1. **Metrics of individual models and the ensemble (n = 2000)**

Model	Accyracy, %	Precission, %	Recall, %	F1-score, %	AUC-ROC
EfficientNet-B0	84.85	87.37	81.50	84.34	91.43
ResNet-50	88.35	91.10	85.00	87.95	94.12
ViT-B/16	86.90	89.50	83.60	86.45	93.02
Ensemble	89.60	92.94	85.70	89.17	96.41

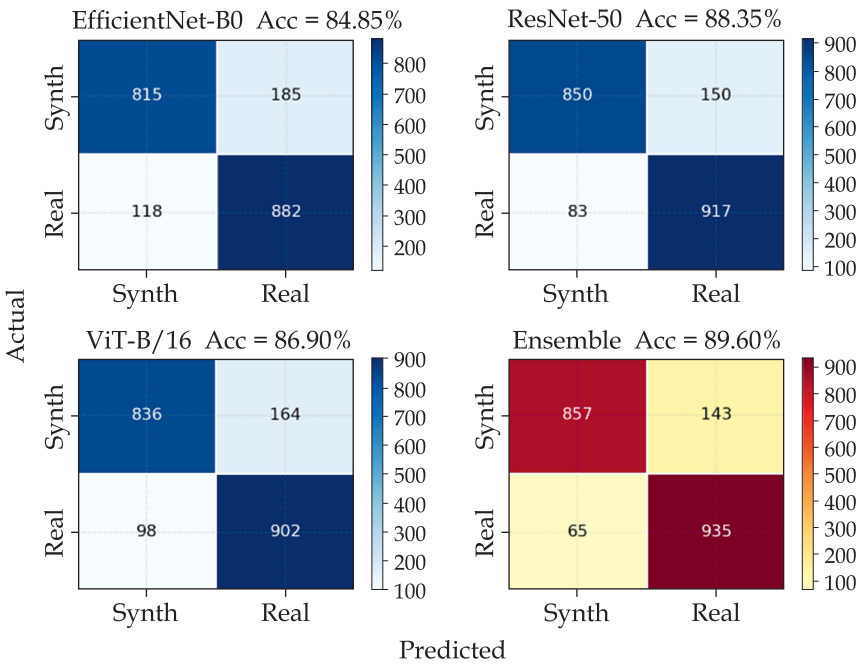


Fig. 1. Ensemble discrepancy matrix (n = 2000)

system correctly classified 935 out of 1,000 authentic images. Regarding the detection of generated content, the ensemble correctly identified 857 out of 1,000 synthetic samples. Although 143 synthetic images evaded detection, this result is notably better compared to the ViT-B/16 (164 misses) and EfficientNet-B0 (185 misses) models, performing on par with the best individual model.

Overall, the integration of the models by averaging their predictions successfully compensated for the individual weaknesses of the baseline architectures, resulting in a substantial reduction in prediction variance and a significant enhancement in the overall reliability of the visual content detector.

EfficientNet-B0 and ResNet-50 detect local textural anomalies, whereas ViT-B/16 analyzes the global patch structure. Their combined averaging reduces prediction variance, as each network compensates for the blind spots of the other. This aligns with the findings of study [8], where a similar combination of EfficientNet-B0 and ViT yielded superior results on the Wild Data dataset.

The accuracy of 89.60% is lower than the 96.60% achieved in study [9] for PV-ISM on the CIFAKE dataset. The reason lies not in the quality of the ensemble, but in the testing conditions: here, the ensemble was evaluated on a combined sample of two datasets, including more realistic images from AI-vs-Real, whereas [9] tested exclusively on low-resolution 32×32 images from CIFAKE. The authors of study [7] documented a similar effect when transitioning between datasets of varying sizes.

Both utilized datasets cover a limited spectrum of generative models; in particular, the CIFAKE database is formed exclusively using the Stable

Diffusion 1.4 architecture. At the same time, as demonstrated by the results of study [4], the effectiveness of detection systems suffers significant degradation when the base generator is changed or image compression algorithms are applied. This vulnerability constitutes a systemic problem for the entire domain, which is also corroborated by the conclusions of the review paper [1].

The precision of 92.94% exceeds the recall of 85.70%. The detector rarely labels authentic photos as synthetic — an essential property for verification applications where a false accusation of forgery is unacceptable. Study [10] also emphasizes the necessity of a careful balance between these metrics depending on the scenario.

The AUC-ROC of 0.9641 is higher than the average level of CNN detectors reported in review [1] and is comparable to systems [6] and [8], which utilize significantly greater resources. Further enhancement is possible through weighted ensembles, expanding the training data with images from next-generation generators, and domain adaptation methods. Furthermore, the authors of studies [2] and [7] highlight Grad-CAM as a promising tool for analyzing which specific forgery features the detector actually utilizes.

Conclusions

In this study, an ensemble software system for detecting artificially generated images was developed and experimentally verified, based on the integration of three complementary neural network architectures: EfficientNet-B0, ResNet-50 and ViT-B/16. The proposed ensemble approach, based on probability averaging, demonstrated its undeniable superiority over the individual models. The system achieved the highest overall accuracy of 89.60% and an AUC-ROC of 96.41%. Furthermore, the ensemble demonstrated high precision (92.94%), substantially reducing the number of false-positive predictions: only 65 instances of mistakenly labeling an authentic image as synthetic were recorded. This confirms the overall reliability of the developed system and its safety when analyzing genuine photographic content.

Such a strong performance was made possible by the synergistic effect of combining fundamentally different architectures. The integration successfully merged the local sensitivity to textural generation artifacts, inherent to the EfficientNet and ResNet convolutional networks, with the global contextual analysis of spatial dependencies provided by the ViT transformer model. This allowed for compensating the individual shortcomings of the baseline classifiers and significantly reducing prediction variance. The practical value of the work is corroborated by the implementation of the developed method as a ready-to-use multi-tier web application with a microservices architecture, addressing the pressing issue of the accessibility of modern detection systems for end users.

Perspectives for future research include expanding the experimental base by integrating images from the latest diffusion models, evaluating the

robustness of the ensemble system against adversarial attacks and complex post-processing methods, as well as optimizing the computational complexity of inference to ensure the system's efficient operation in real time.

DECLARATIONS

Author Contributions. *Holub T.: Conceptualization, Software, Investigation, Data Curation, Writing – Original Draft, Visualization. Dukhnovska K.K.: Methodology, Supervision, Writing – Review & Editing.*

AI and Automated Tools Usage. *During the preparation of this manuscript, the authors used Claude (Anthropic) to assist with text editing and language refinement. All scientific content, experimental results, and conclusions were produced and verified by the authors. The authors take full responsibility for the content of this publication.*

Conflict of Interest. *The authors declare no conflict of interest.*

Grant or Financial Support. *This research received no external funding.*

REFERENCES

1. Castillo Camacho I., Wang K. A Comprehensive Review of Deep-Learning-Based Methods for Image Forensics. *Journal of Imaging*, 2021, Vol. 7 (7), Article 69. https://doi.org/10.3390/jimaging7070069
2. Bird J.J., Lotfi A. CIFAKE: Image Classification and Explainable Identification of AI-Generated Synthetic Images. *IEEE Access*, 2024, Vol. 12, 15642–15650. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3356122
3. Patel Y., Tanwar S., Bhattacharya P., et al. An Improved Dense CNN Architecture for Deepfake Image Detection. *IEEE Access*, 2023, Vol. 11, 22081–22095. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3251753
4. Lu S., Ebrahimi M. Assessment Framework for Deepfake Detection in Real-World Situations. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2024, Vol. 2024, Article 9. https://doi.org/10.1186/s13640-024-00624-5
5. Lei S., Song J., Feng F., et al. Deepfake Face Detection and Adversarial Attack Defense Method Based on Multi-Feature Decision Fusion. *Applied Sciences*, 2025, Vol. 15 (12), Article 6588. https://doi.org/10.3390/app15126588
6. Tran V.-N., Lee S.-H., Le H.-S., Kwon K.-R. DiffCoR: Exposing AI-Generated Image by Using Stable Diffusion Model. *IEEE Open Journal of Computer Society*, 2025, vol. 6, 1353–1365. https://doi.org/10.1109/OJCS.2025.3575507
7. Lokner Lađević A., Kramberger T., Kramberger R., Vlahek D. Detection of AI-Generated Synthetic Images with a Lightweight CNN. *AI*, 2024, Vol. 5 (3), 1575–1593. https://doi.org/10.3390/ai5030076
8. Yang Q., Cai Y., Yan R., Zhang G. Detecting Deepfakes Using Two-Stream Framework Based on EfficientNet and Vision Transformer. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2026, Vol. 2026, Article 9686924. https://doi.org/10.1155/jece/9686924
9. Çınar O., Doğan Y. Novel Deepfake Image Detection with PV-ISM: Patch-Based Vision Transformer for Identifying Synthetic Media. *Applied Sciences*, 2025, Vol. 15 (12), Article 6429. https://doi.org/10.3390/app15126429
10. Guarnera L., Giudice O., Guarnera F., et al. The Face Deepfake Detection Challenge. *Journal of Imaging*, 2022, Vol. 8 (10), Article 263. https://doi.org/10.3390/jimaging8100263

Received 11.06.2026
Accepted 21.08.2026
Published 23.10.2026

К.К. ДУХНОВСЬКА, канд. техн. наук, доцент,
каф. програмних систем і технологій,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Богдана Гаврилишина, 24, Київ, 02000, Україна
https://orcid.org/0000-0002-4539-159X
SCOPUS ID: 57433704700
duchnov@ukr.net
Т.І. ГОЛУБ, студентка,
каф. програмних систем і технологій,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Богдана Гаврилишина, 24, Київ, 02000, Україна
https://orcid.org/0009-0004-1178-7264
tetiana_holub@knu.ua

ВИЯВЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ, ЗГЕНЕРОВАНИХ ШІ, ЗА ДОПОМОГОЮ АНСАМБЛЮ *EFFICIENTNET, RESNET І VISION TRANSFORMER*

Вступ. Інтенсивний розвиток архітектур генеративно-змагальних мереж та дифузійних моделей зумовив появу алгоритмів синтезу візуальних даних, які за своїми перцептивними характеристиками практично не відрізняються від автентичних цифрових зображень, отриманих за допомогою оптичних сенсорів. Такий контент уже фіксується у судових матеріалах, новинних публікаціях і тренувальних датасетах — на відміну від ранніх *GAN*-підробок, де артефакти були помітні без спеціальних інструментів.

Мета статті. Ця обставина формує актуальну науково-прикладну задачу: розроблення автоматизованих методів ідентифікації згенерованих зображень, що здатні забезпечити високу точність детектування в масштабі реального часу без жорстких вимог щодо наявності спеціалізованих апаратних прискорювачів на стороні клієнта.

Методи. У межах цієї роботи запропоновано та програмно реалізовано метод класифікації візуальних даних, в основу якого покладено ансамблювання трьох комплементарних нейромережевих архітектур: згорткових мереж *EfficientNet-B0* і *ResNet-50* та моделі на базі механізму уваги *Vision Transformer*. Адаптація моделей до предметної області здійснювалася із застосуванням парадигми трансферного навчання. Використання вагових коефіцієнтів, попередньо оптимізованих на масиві даних *ImageNet*, забезпечило ефективну екстракцію базових візуальних ознак на початкових етапах аналізу. Запропонований підхід дає змогу нівелювати вплив локальних похибок окремих моделей та суттєво підвищити загальну стійкість системи до вхідних шумів.

Результати. Емпірична оцінка ефективності запропонованого методу проводилася на репрезентативній тестовій вибірці обсягом 2000 зображень, які не використовувалися на етапі навчання. За результатами експериментальних досліджень класифікатор продемонстрував такі метрики якості: точність на рівні 89,60 %, прецизійність — 92,94 %, повнота — 85,70 %, F_1-міра — 89,17 %, а також *AUC-ROC* 0,9641. Отримані результати підтверджують наукову гіпотезу щодо доцільності інтеграції різнорідних архітектур.

Висновки. Ансамблевий детектор на основі *EfficientNet-B0*, *ResNet-50* і *ViT-B/16* перевершує кожну модель окремо і придатний для практичного застосування у веб-середовищі.

Ключові слова: *виявлення синтетичних зображень, deepfake, ансамблева модель, EfficientNet, Vision Transformer, transfer learning, CIFAKE.*

https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.112
УДК 004.415.538

К.О. КОХАН, аспірант,
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна
https://orcid.org/0009-0002-8878-8527
kokhan.kyrylo@gmail.com

ПРОДУКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМАЛЬНИХ КОНФІГУРАЦІЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЕСТУВАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СИСТЕМ

У статті досліджено продуктивність та обчислювальну стабільність технології оптимізації тестових конфігурацій багатокомпонентних систем. Технологію реалізовано як проміжне програмне забезпечення з інтерфейсом командного рядка (CLI Middleware) на базі середовища Node.js із застосуванням комбінаторних методів (Pairwise Testing, Orthogonal Arrays) та еволюційних обчислень (генетичних алгоритмів). Для усунення ризиків блокування головного циклу (Event Loop) впроваджено суворо детерміновані параметри еволюційного пошуку (30 поколінь, популяція 50). Експериментальне еталонне тестування підтвердило здатність системи стискати простір конфігурацій на 70,0–86,0% при математично доведеному збереженні 100% покриття попарних взаємодій (за допомогою розробленого програмного модуля валідації покриття). Зафіксований час виконання обчислювального ядра становить від 6 до 12 мс, що робить розробку ідеально придатною для синхронних конвеєрів безперервної інтеграції та розгортання (CI/CD).

Ключові слова: *оптимальні конфігурації, CLI Middleware, Node.js, Pairwise Testing, генетичні алгоритми, CI/CD, математичні моделі.*

Вступ

Масштабний перехід індустрії програмного забезпечення до розподілених мікросервісних та хмарних (*cloud-native*) архітектур суттєво підвищив гнучкість та обчислювальну потужність інформаційних систем. Водночас поліглотне збереження даних і технологічна гете-

Цитування: Кохан К.О. Продуктивність технології оптимальних конфігурацій для автоматизованого тестування багатокомпонентних систем. I*nformation Technologies and Systems*, Київ, 2026, Том 4 (10), 112–119. https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.04.112

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

рогенність призвели до виникнення явища «дрейфу середовищ» (*environment drift*). Забезпечення якості таких екосистем вимагає верифікації кодової бази на десятках комбінацій інфраструктурних параметрів, що охоплюють різні версії фронтенд-фреймворків, бекенд-рушіїв, систем керування базами даних та веб-браузерів [1–4].

Окреслення проблеми

В умовах сучасного розроблення програмного забезпечення на основі мікросервісних та хмарних архітектур верифікація якості вимагає тестування систем на гетерогенних конфігураційних матрицях. Повний комбінаторний перебір всіх можливих станів призводить до явища «комбінаторного вибуху», коли навіть для помірної кількості параметрів кількість конфігурацій сягає тисяч запусків. Виконання такого обсягу тестів у конвеєрах безперервної інтеграції та розгортання (*CI/CD*) стикається з нездоланними інфраструктурними й фінансовими обмеженнями: вичерпанням пулів з'єднань (*Connection Pool exhaustion*), перевищенням лімітів зовнішніх *API* (*rate limiting*) та критичним зростанням витрат на хмарні обчислення (*FinOps*) [3, 5–6]. Основна науково-технічна суперечність полягає в тому, що наявні еволюційно та комбінаторні алгоритми оптимізації просторів тестування розроблені для автономного виконання і не враховують обмежень середовищ реального часу *CI/CD*. Зокрема, імплементація обчислювально-містких генетичних алгоритмів або алгоритмів перебору в однопотоковому середовищі *Node.js* генерує високий ризик блокування головного циклу (*Event Loop*). Це призводить до відмови всього процесу інтеграції. Отже, виникає гостра потреба у розробці адаптивного механізму маршрутизації та детермінованих методів стиснення, які б гарантували високе покриття взаємодій за мінімального часу виконання (на рівні мілісекунд) без блокування ресурсів *CI/CD*.

Мета

Метою дослідження є проведення огляду продуктивності, експериментальне еталонне тестування та перевірка обчислювальної стабільності розробленого прототипу інформаційної технології (у форматі *CLI Middleware*) для вибору оптимальних тестових конфігурацій багатокомпонентних систем в умовах, наближених до промислових.

Хоча в академічному середовищі запропоновано чимало еволюційних алгоритмів для стиснення тестових просторів, вони переважно ігнорують реальні обмеження середовищ виконання. Наприклад, імплементація обчислювально важких генетичних алгоритмів (ГА) в асинхронному однопотоковому середовищі *Node.js* генерує високий ризик блокування головного циклу (*Event Loop*). Блокування головного циклу під час синхронного етапу конвеєра *CI/CD* є критичним архітектурним дефектом, що призводить до відмови всього процесу інтеграції [7].

Матеріали та методи

Фундаментальною архітектурною аксіомою розробленої системи є її функціонування виключно у форматі *CLI Middleware*, що ініціалізується як синхронний обчислювальний крок у межах конвеєра *CI/CD* (наприклад, у середовищі *GitHub Actions або Jenkins*). Технологія свідомо уникає парадигми мікросервісу на базі *REST API* для внутрішньої маршрутизації. Це архітектурне рішення повністю усуває мережеві затримки (*Network Latency*) та нівелює кількість потенційних точок відмови (*Points of Failure*) під час конвеєрного виконання.

Обчислювальний процес оркеструється модульною архітектурою, яка об'єднує підсистему управління життєвим циклом даних, модуль інтелектуальної адаптивної маршрутизації (селектор) та модуль алгоритмічної імплементації методів оптимізації.

Математично повний простір можливих тестових конфігурацій S_{full} формується як декартовий добуток розмірностей усіх параметрів системи. Такий підхід є базовою моделлю сучасного комбінаторного тестування та використовується для побудови компактних тестових наборів у промислових системах [3, 6]:

$$S_{full} = \Pi_{i=1}^{k} Vi, \tag{1}$$

де k — кількість інфраструктурних параметрів, а Vi — кількість можливих значень (варіативність) для i-го параметра.

Логіка функціонування підсистеми інтелектуальної маршрутизації (Рис. 1) реалізує багаторівневий алгоритм прийняття рішень на основі аналізу топології простору S_{full}:

1. Аналіз вхідного простору: на першому кроці обчислюється загальна кількість конфігурацій $N = |S_{full}|$ та середня варіативність параметрів $V = Avg(V_i)$ [8–9].

2. Маршрутизація за розмірністю (N):

• малий простір ($N \leq 100$): передається безпосередньо модулю *Pairwise Testing* (*Greedy*), оскільки для малих матриць жадібні алгоритми забезпечують миттєву генерацію оптимального покриття за час ≤ 10 мс;

• середній простір ($100 < N \leq 500$): вибір алгоритму додатково аналізує фактор варіативності V. Якщо $V \leq 2{,}5$ (низька варіативність, параметри мають збалансовану кількість значень), застосовуються ортогональні масиви (*Orthogonal Arrays*), які дають математично збалансоване рівномірне покриття. Якщо $V > 2{,}5$ (висока дисперсія розмірностей), система маршрутизує задачу до *Pairwise Testing*, який краще адаптується до незбалансованих факторів;

• надвеликий простір ($N > 500$): система автоматично підключає детермінований генетичний алгоритм, оскільки комбінаторні методи на великих матрицях втрачають обчислювальну ефективність, а (ГА) дає змогу знайти квазіоптимальне рішення за фіксовану кількість поколінь (*Gen* = 30, *PopSize* = 50).

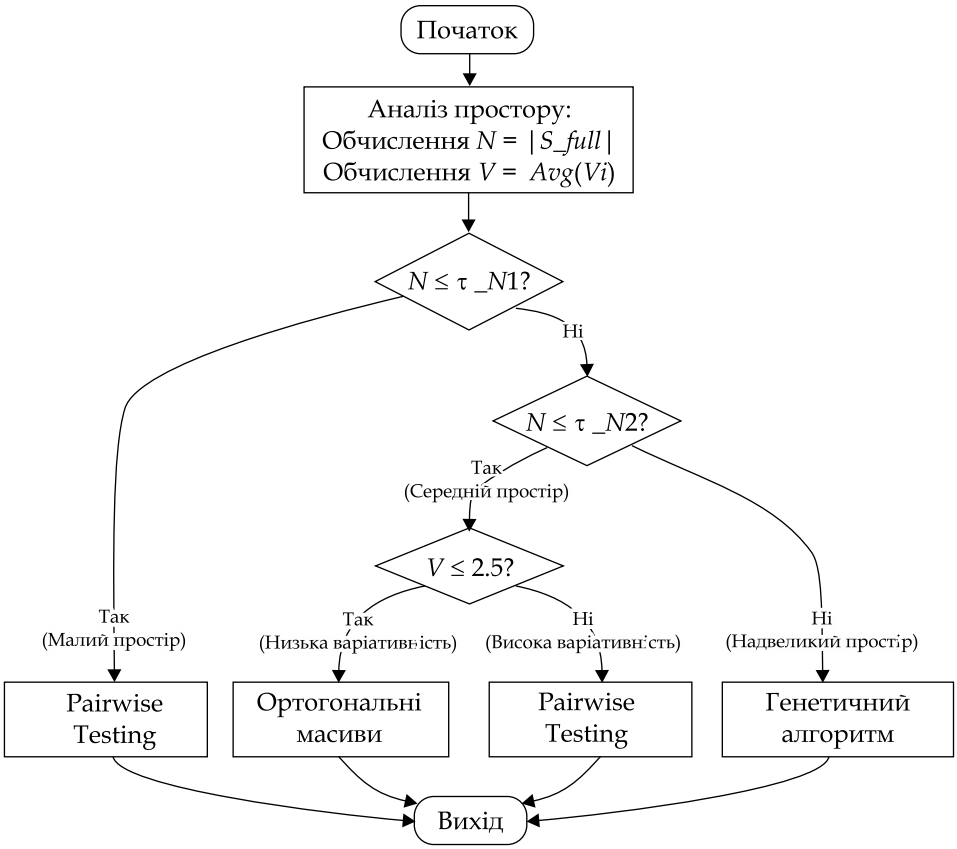


Рис. 1. Блок-схема адаптивного вибору методів оптимізації підсистемою маршрутизації(на рис. 1 англ. літери прокурсивити)

Для абсолютного унеможливлення блокування головного циклу під час роботи генетичного алгоритму, на еволюційний цикл накладено суворі інфраструктурні обмеження:

$$Gen = 30; \ PopSize = 50. \tag{2}$$

Механізм раннього зупинення (*Early Stopping*) було навмисно відключено. Цей крок забезпечує константну часову складність $O(1)$ відносно кількості ітерацій i гарантує суворо передбачуваний час виконання скрипту, незалежно від наявності аномалій у вхідних даних.

Генетичний алгоритм оперує популяцією хромосом (масивів конфігурацій). Використовуються такі оператори:

- селекція: турнірний відбір з динамічним розміром турніру;
- схрещування (*Crossover*): одноточковий кросовер зі зсувом для хромосом різної довжини;
- мутація: точкове заміщення з імовірністю $p_m = 0{,}2$ та обов'язковою внутрішньою дедуплікацією генів (конфігурацій).

З метою балансування навантаження на обчислювальні вузли (*workers*) алгоритм також використовує функцію аугментації, яка за-

побігає створенню оптимальних матриць S_{opt} розміром менше мінімального порогу N_{min} = 5, дублюючи релевантні конфігурації для ефективного завантаження доступних паралельних вузлів кластера.

Математична валідація повноти покриття дефектів взаємодії суворо ізольована в розробленому програмному модулі валідації покриття. Цей модуль рекурсивно перевіряє наявність усіх згенерованих попарних (2-*wise*) комбінацій у результуючій матриці S_{opt}, гарантуючи якість стиснення.

Для кількісного оцінювання та порівняльного аналізу ефективності розробленої технології порівняно з наявними підходами застосовано 7-факторний інтегральний критерій ефективності $I(j)$, формалізований та апробований авторами у попередніх працях [5, 7]. Математично критерій є адитивною згорткою нормалізованих факторів:

$$I(j) = \sum_{i=1}^{7} W_i \cdot P_{ij} \to \max \in [0, 1], \quad (3)$$

де $I(j)$ — ідентифікатор аналізованого методу оптимізації; $P_{ij} \in [0, 1]$ — нормалізоване значення i-гоо параметра ефективності для j-го методу; W_i — ваговий коефіцієнт значущості j-го критерію ($\sum_{i=1}^{7} W_i = 1$), обчислений на основі аналізу наукових праць та експертного оцінювання [5].

1. Кількість тестів (W_1 = 0,20): оцінка ступеня скорочення підмножини конфігурацій порівняно з повним декартовим простором S_{full};

2. покриття критичних сценаріїв (W_2 = 0,25): повнота покриття двофакторних (2-*wise*) взаємодій компонентів (максимальний пріоритет надійності);

3. адаптивність до змін (W_3 = 0,15): здатність методу динамічно пристосовуватися до зміни вхідної варіативності параметрів ІС;

4. використання історичних даних (W_4 = 0,10): рівень залежності алгоритму від наявності накопиченої статистики про минулі запуски (відсутність проблеми «холодного старту»);

5. інтеграція з *CI/CD* (W_5 = 0,15): безшовність впровадження ядра у конвеєри безперервної інтеграції та розгортання (*GitHub Actions, Jenkins*);

6. обчислювальні ресурси (W_6 = 0,10 рівень витрат процесорного часу та оперативної пам'яті на виконання самого алгоритму оптимізації;

7. складність впровадження (W_7 = 0,05): трудомісткість налаштування та конфігурування програмного прототипу.

Результати

Експериментальне тестування (бенчмаркування) проводилося на двох типових синтетичних наборах параметрів, що достовірно імітують багатокомпонентні середовища:

• Набір 1 (низька складність): 5 параметрів із розмірностями (2, 3, 2, 3, 3), що формують S_{full} = 108 конфігурацій.

Таблиця 1. **Емпіричні результати стиснення простору конфігурацій (Бенчмаркування)**

Тестовий набір	Початковий обсяг S_{fill}	Метод оптимізації (Селектор)	Оптимізований обсяг S_{opt}	Коефіцієнт стиснення (%)
Suite 1	108 конфігурацій	*Pairwise Testing* (*Greedy*)	15 конфігурацій	86,11%
Suite 2	243 конфігурації	*Integrated Method* (*Pairwise* + *GA*)	34 конфігурації	86,01%
У середньому	≈100-300	Адаптивна маршрутизація	12 – 35	70,0 – 86,0%

• Набір 2 (середня складність): 5 параметрів із розмірностями (3, 3, 3, 3, 3), що формують S_{full} = 243 конфігурації.

Усі обчислення та метрики продуктивності автоматично агрегувалися у вихідних файлах звітів та метрик. Ключовим показником успішності є коефіцієнт алгоритмічного просторового стиснення, який прямо пропорційно зменшує інфраструктурні витрати. Емпіричні результати подано в табл. 1.

Як засвідчують експериментальні дані, розроблений *CLI Middleware* стабільно зменшує обсяг тестових запусків на 70,0–86,0 %. Це повністю ліквідує проблему вичерпання пулів з'єднань, оскільки кількість необхідних паралельних з'єднань з базами даних скорочується із сотень до безпечного ліміту в 15–35 активних вузлів.

Критично важливим є те, що журнали виконання модуля перевірки покриття підтвердили: для обох тестових наборів згенеровані стиснуті матриці гарантують 100% покриття всіх можливих попарних комбінацій (2-*wise coverage*), що відповідає сучасним підходам комбінаторного тестування, згідно з якими більшість дефектів спричиняються взаємодією невеликої кількості параметрів, а ефективне покриття 2–6-*way* взаємодій забезпечує високу надійність систем при істотному скороченні кількості тестів [3–4, 8–9]. Це є суворим математичним доказом того, що відсікання 86 % простору конфігурацій відбулося без жодного зниження ймовірності виявлення дефектів взаємодії.

Зафіксований час виконання обчислювального алгоритмічного ядра в середовищі *Node.js* знаходився у жорстких межах від 6 до 12 мс. Цей показник остаточно підтверджує успішне вирішення проблеми блокування головного циклу і гарантує відсутність операційних вузьких місць. На основі проведених вимірювань, емпіричний інтегральний показник ефективності для запропонованого інтегрованого підходу склав: $I(j)$ = 0,9725.

Висновки

У межах дослідження доведено критичну важливість оптимізації тестових просторів та експериментально підтверджено високу продуктивність розробленої інформаційної технології. Архітектурне проєктування системи у вигляді *CLI Middleware* на платформі *Node.js* забезпечує безпрецедентну швидкість обчислень на рівні мілісекунд (6–12 мс), повністю виключаючи ризики блокування головного циклу завдяки суворій детермінації параметрів еволюційного пошуку (відсутність раннього зупинення, рівно 30 поколінь, популяція 50).

Встановлено, що запропонований інтелектуальний механізм маршрутизації здатен автоматично стискати декартові простори конфігурацій (розмірністю 108 та 243) на 70,0–86,0 %. Водночас модуль перевірки покриття засвідчив беззаперечне збереження стовідсоткового 2-*wise* покриття. Досягнення емпіричного інтегрального показника $I(j) = 0,9725$ підтверджує абсолютну готовність розробленої технології до промислової інтеграції в корпоративні конвеєри *CI/CD*, що ефективно розв'язує бюджетні обмеження *FinOps* та ліміти інфраструктурних потужностей без компромісів щодо якості тестування.

ПОВІДОМЛЕННЯ

Внесок авторів. *Кохан К. О. – концептуалізація, розробка програмного забезпечення, проведення експериментів, збір даних, перевірка результатів, написання тексту.*

Застосування ШІ та інших інструментів. *Автор заявляє, що інструменти штучного інтелекту не використовувалися при написанні статті.*

Конфлікт інтересів. *Автор заявляє про відсутність будь-яких фінансових чи нефінансових конфліктів інтересів, які могли б вплинути на результати цього дослідження.*

Фінансування. *Автор заявляє, що під час підготовки цього рукописи не отримував жодних коштів, грантів чи іншої підтримки.*

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Grindal M., Offutt J., Andler S.F. Combination Testing Strategies: A Survey. *Software Testing, Verification and Reliability*, 2005, Vol. 15 (3), 167–199. https://doi.org/10.1002/stvr.319
2. Nie C., Leung H. A Survey of Combinatorial Testing. *ACM Computing Surveys*, 2011, Vol. 43 (2), 1–29. https://doi.org/10.1145/1883612.1883618
3. Raunak M.S., Kuhn D.R., Kacker R.N., Lei Y. Combinatorial Testing for Building Reliable Systems. *IEEE Reliability Magazine,* 2024, Vol. 1 (1), 15–19. https://doi.org/10.1109/MRL.2024.3355874
4. Baumann C., Koroglu Y., Wotawa F. On the Impact of Input Models on the Fault Detection Capabilities of Combinatorial Testing. *SN Computer Science*, 2024, Vol. 5 (7), Article 821. DOI: https://doi.org/10.1007/s42979-024-03134-3
5. Kokhan K.O., Tkachenko O.M. Review and proposal for optimization of optimal configurations for automated testing of multi-component information systems. *Information Technologies and Society*, 2025, Vol. 3 (18), 83–87. https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.3.11
6. Kuhn R., Kacker R., Lei Y. Introduction to Combinatorial Testing. *CRC Press*, Boca Raton, 2013. https://doi.org/10.1201/b14957
7. Kokhan K.O., Tkachenko O.M. Implementation and testing of the configuration optimization module for automated testing of multi-component information systems.

Computer-integrated technologies: education, science, production, 2025, Vol. 61, 18–23. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-03
8. Lei Y., Tai K. C. In-Parameter-Order: A Test Generation Strategy for Pairwise Testing. *3rd IEEE International High-Assurance Systems Engineering Symposium*, 1998, 254–261. https://doi.org/10.1109/HASE.1998.731623
9. Mandl R. Orthogonal Latin Squares: A Tool for the Design of Experiments in Testing. *Communications of the ACM*, 1985, Vol. 28 (10), 1054–1058. https://doi.org/10.1145/4372.4375

Отримано/Received 01.07.2026
Прийнято/Accepted 09.09.2026
Опубліковано/Published 23.10.2026

K.O. KOKHAN, PhD Student,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
15, Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine
https://orcid.org/0009-0002-8878-8527
kokhan.kyrylo@gmail.com

PRODUCTIVITY OF TECHNOLOGY OPTIMUM CONFIGURATIONS FOR AUTOMATED TESTING OF RICH COMPONENT SYSTEMS

Introduction. The transition of the software industry to distributed microservice and cloud-native architectures has significantly increased the flexibility of information systems, but has led to the phenomenon of "environment drift." Exhaustive testing of such ecosystems causes a "combinatorial explosion," which, under continuous integration and continuous deployment (CI/CD) pipelines, leads to connection pool exhaustion and critical budget overruns on cloud computing (FinOps), making complete enumeration impossible.

Objective. Conducting a performance review, experimental benchmarking, and verifying the computational stability of the developed prototype of information technology (in the format of CLI Middleware) for selecting optimal test configurations of multi-component systems under conditions close to industrial ones.

Methods. An information technology has been developed in the form of CLI Middleware based on Node.js using combinatorial methods (Pairwise Testing, Orthogonal Arrays) and evolutionary computations (genetic algorithms). To completely prevent the blocking of the main execution cycle (Event Loop), strictly deterministic evolutionary search parameters have been implemented (30 generations, population of 50) and the early stopping mechanism (Early Stopping) has been disabled.

Results. Experimental benchmarking on synthetic test suites (108 and 243 configurations) confirmed the system's ability to automatically compress the configuration space by 70.0–86.0%. An isolated mathematical validation module proved the preservation of 100% coverage of pairwise (2-wise) interactions. The recorded execution time of the computational core is 6–12 ms, making it ideally suited for use as a synchronous step in CI/CD pipelines.

Conclusions. The effectiveness of the developed information technology has been proven, successfully solving the "combinatorial explosion" problem and eliminating the risks of blocking the main cycle. Achieving an integral efficiency metric of 0.9725 confirms the absolute readiness of the CLI Middleware architecture for industrial integration into corporate pipelines, allowing significant optimization of infrastructure costs without compromising the quality of interaction defect detection.

Keywords: *optimal configurations, CLI Middleware, Node.js, Pairwise Testing, genetic algorithms, CI/CD, mathematical models.*

AUTHOR GUIDELINES

The journal publishes the results of research in the field of computer science, information technologies and systems and their applications in various fields of activity, system analysis, intelligent control, cyber security, biological and medical cybernetics, digital economy and learning in the digital age, etc.

Target audience — scientists, engineers, graduate students and students of higher educational institutions of the relevant specialty.

Requirements for manuscripts

1. The manuscript is accepted in electronic form, if possible — on paper in one copy (language of the article — English (*in priority*) or Ukrainian, manuscript up to 30 pages). The manuscript should contain:

• information about the Authors in English and Ukrainian: Full name, Academic Degree, Academic Title, Position, Affiliations (name and ROR), Postal address of the organization, Direct links to author's ORCID (if necessary, Researcher ID) and E-mail, Author-correspondent and their telephone number (*for contacting the editor*);

• Short Abstract with keywords in paper language, and Extended Abstract with keywords in either Ukrainian for English-language paper or English for Ukrainian-language paper. The text of the Extended Abstract is not less than 1800 characters with spaces, by headings: *Introduction*, *The purpose of the paper*, *Methods, Results, Conclusions, Keywords* (5–8 words);

• *DECLARATIONS*: in this section the authors declare 1) *Author contributions* in accordance with CRediT Roles or another standard; 2) *AI and tools usage* in accordance with the journal policy; 3) *Conflict of interest:* existing and type of conflict or no should be disclosed; 4) *Grant or Financial Support* for the research provide information about if it necessary; 5) *Thanks, etc.*

• *REFERENCES* — a list of sources in English in the order of mention in the text. For Non-English-language sources, citation are translated, the original language is indicated in square brackets, for Ukrainian-language papers information about authors and the title in the original language is given. Examples for design of the References is given below.

2. The text of the paper should be submitted with the following mandatory headings: *Introduction, Problem Statement / Problem Definition, Objective, Results, and clearly formulated Conclusions*.

Requirements for the text file

File format: *.doc, *.rtf. Applicable styles: Times New Roman font, 12 pt, without a hyphen for a line break, line spacing — 1.0. Paper size: A4, all sides — 2 cm.

Formulas are typed in Formula Editors (preferably Microsoft Equation Editor 3.0. and MathType 6.9b.) Formula Editor options are (10.5; 8.5; 7.5; 14; 10). **The width of formulas is up to 12 cm.**

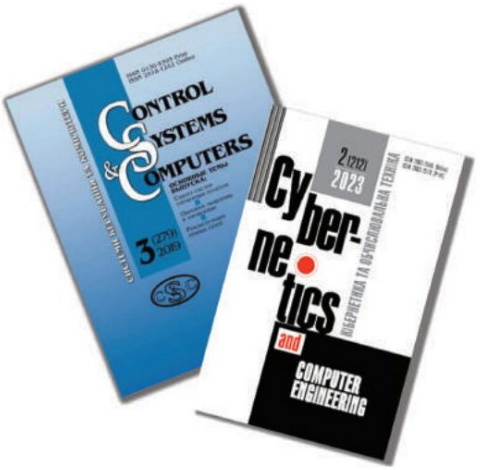
Figures must be of high quality, they are provided in separate files of appropriate formats (*.png, *.jpg, *.tiff, etc.). **The width of the figures is up to 12 cm.**

Tables are created using a standard text editor built into the Table toolkit. **The width of the table is up to 12 cm.**

УДК 004.6/.9+519+62

Journal *"Information Technologies and Systems"* that is a merger of two academic journals with a long history — Control Systems and Computers journal ISSN (Print) 2706-8145, ISSN (Online) 2706-8153 (published since 1972) and Cybernetics and Computer Engineering journal ISSN (Print) — 2663-2578, ISSN (Online) — 2663-2586 (published since 1965). The organization responsible for publishing the journal is Institute of Information Technologies and Systems of National Academy of Sciences of Ukraine.

The journal publishes original scientific and review papers about fundamental and applied research results of informatics and information technologies, intelligent control and systems, methods and means of information technology support of knowledge, application of the mentioned technologies in various fields of life. Number of Issues is 6 per year. Currently, the journal does not charge any fees to the authors from submission to publication. The papers are an Open Access under the CC BY-NC-ND 4.0 license.



Журнал «Інформаційні технології та системи» є результатом об'єднання двох академічних журналів з багаторічною історією — журналу «Системи керування та обчислювальна техніка» ISSN (друковане видання) 2706-8145, ISSN (онлайн) 2706-8153 (видавався з 1972 року) та журналу «Кібернетика та обчислювальна техніка» ISSN (друковане видання) — 2663-2578, ISSN (онлайн) — 2663-2586 (видавався з 1965 року). Організацією, відповідальною за видання журналу, є Інститут інформаційних технологій та систем Національної академії наук України.

Журнал публікує оригінальні наукові та оглядові статті про фундаментальні та прикладні результати досліджень інформатики та інформаційних технологій, інтелектуального керування та систем, методів та засобів інформаційно-технологічної підтримки знань, застосування згаданих технологій у різних сферах життя. Кількість випусків — 6 на рік. Наразі журнал не стягує жодних гонорарів з авторів від моменту подання до публікації. Статті знаходяться у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0.

ISSN 3083-6573 Information Technologies and Systems 2026, № 4. 1–120