

МЕТОД ВЕРИФІКАЦІЇ МІСЦЕВОСТІ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ВІЗУАЛЬНИХ ОЗНАК

Л.Г. Юдіна *, С.О. Кашкевич

ORCID: [0000-0001-7496-8418](https://orcid.org/0000-0001-7496-8418); [0009-0007-2406-8535](https://orcid.org/0009-0007-2406-8535)

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

* Листування: 6433061@stud.kai.edu.ua

Open Access under [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) License

UDC 004.932:004.82:519.87

Method of Verifying Terrain Based on Analysis of Visual Features

Lyudmila Yudina *, Svitlana Kashkevych

Kyiv Aviation Institute, Ukraine

* Correspondence: 6433061@stud.kai.edu.ua

The article presents an approach to terrain verification based on the analysis of visual features in distributed information systems. The proposed approach is based on formalising the process of spatial matching of reference and current visual scenes, followed by a quantitative assessment of their correspondence. A step-by-step mathematical model has been developed that takes into account the presence of errors, incomplete data, and variable conditions for the formation and transmission of visual information. The paper introduces a terrain verification criterion that allows making an informed decision about the correspondence of a scene to a given area of space. The effectiveness of the proposed approach is confirmed by the results of simulation modelling, which demonstrate the dependence of verification accuracy on the noise level, the number of visual correspondences, and the threshold parameters of the model.

The purpose develop a method for verifying terrain based on the analysis of visual features and a corresponding mathematical model that provides a quantitative assessment of the scene's correspondence to a given terrain area.

Results. To evaluate the effectiveness of the proposed terrain verification method, a series of simulation experiments were conducted in the Python environment. The experiments investigated the influence of the main parameters of the mathematical model on the accuracy of the decision regarding the correspondence of the current visual scene to a given terrain area. In particular, the influence of the noise level in the input data, the number of visual matches, and the choice of the verification criterion threshold value were analysed.

Conclusions. As a result of the study, a method for verifying terrain based on the analysis of visual features was developed and experimentally tested, which provides a formalised decision-making process regarding the correspondence of a visual scene to a given area of space. Simulation modelling confirmed the stability of the proposed mathematical model to noise, incomplete data and changes in basic parameters, which indicates the feasibility of applying the method as part of information technologies for processing visual data in distributed systems.

Keywords: verification of terrain, visual signs, mathematical model, spatial coordination, visual data, simulation modelling, decision-making criteria, distributed systems, image processing.

Анотація

У статті представлено підхід до верифікації місцевості на основі аналізу візуальних ознак у розподілених інформаційних системах. Запропонований підхід ґрунтується на формалізації процесу просторового узгодження еталонної та поточної візуальних сцен з подальшою кількісною оцінкою їх відповідності. Розроблено покрокову математичну модель, яка враховує наявність похибок, неповноту даних та змінні умови формування і передачі візуальної інформації. У роботі введено критерій верифікації місцевості, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо відповідності сцени заданій ділянці простору. Ефективність запропонованого підходу підтверджено результатами імітаційного моделювання, які демонструють залежність точності верифікації від рівня шуму, кількості візуальних відповідностей та порогових параметрів моделі.

Мета роботи. Розробити метод верифікації місцевості на основі аналізу візуальних ознак та відповідної математичної моделі, що забезпечує кількісну оцінку відповідності сцени заданій ділянці місцевості.

Результати. Для оцінювання ефективності запропонованого методу верифікації місцевості було проведено серію імітаційних експериментів, реалізованих у середовищі Python. В межах експериментів досліджувався вплив основних параметрів математичної моделі на точність прийняття рішення щодо відповідності поточної візуальної сцени заданій ділянці місцевості. Зокрема аналізувався вплив рівня шуму у вхідних даних, кількості візуальних відповідей та вибору порогового значення критерію верифікації.

Висновки. У результаті проведеного дослідження розроблено та експериментально перевірено метод верифікації місцевості на основі аналізу візуальних ознак, який забезпечує формалізоване прийняття рішення щодо відповідності візуальної сцени заданій ділянці простору. Імітаційне моделювання підтвердило стійкість запропонованої математичної моделі до шумів, неповноти даних та змін основних параметрів, що свідчить про доцільність застосування методу в складі інформаційних технологій обробки візуальних даних у розподілених системах.

Ключові слова: верифікація місцевості, візуальні ознаки, математична модель, просторове узгодження, візуальні дані, імітаційне моделювання, критерій прийняття рішення, розподілені системи, обробка зображень.

Вступ. Сучасні інформаційні системи дедалі частіше працюють з візуальними даними, які формуються та передаються між різними вузлами розподіленого середовища. У таких системах візуальна інформація використовується не лише для аналізу окремих об'єктів, а й для ідентифікації та верифікації просторових сцен, що мають відповідати певним координатним або територіальним обмеженням. У зв'язку з цим зростає актуальність задачі верифікації місцевості, тобто підтвердження відповідності поточної візуальної сцени визначеній ділянці простору.

Традиційні підходи до ідентифікації місцевості здебільшого ґрунтуються на координатних даних або метаданих, що супроводжують візуальну інформацію. Проте в умовах обмеженої точності позиціонування, затримок передавання даних та можливих спотворень ці підходи не забезпечують достатнього рівня достовірності. У таких випадках виникає необхідність використання візуальних ознак сцени як додаткового джерела інформації для підтвердження або спростування відповідності місцевості.

В межах даного дослідження задача верифікації місцевості розглядається як окрема інформаційна процедура, що базується на аналізі візуальних ознак, їх просторовому узгодженні та подальшій оцінці достовірності отриманих результатів. Основну увагу зосереджено на розробленні формалізованої математичної моделі, яка дозволяє представити процес верифікації у вигляді послідовності взаємопов'язаних етапів та не залежить від конкретних реалізацій методів аналізу зображень.

Метою статті є розроблення методу верифікації місцевості на основі аналізу візуальних ознак і відповідної математичної моделі, що забезпечує кількісну оцінку відповідності сцени заданій ділянці місцевості. Для підтвердження ефективності запропонованого підходу проведено імітаційне моделювання, результати якого дозволяють проаналізувати вплив основних параметрів моделі на точність та стійкість прийняття рішень.

Виклад основного матеріалу. Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що значна увага приділяється задачам розпізнавання об'єктів та аналізу зображень, однак питання верифікації місцевості часто розглядаються фрагментарно або зводяться до використання окремих алгоритмів комп'ютерного зору. Водночас недостатньо уваги приділяється формалізації процесу верифікації на рівні математичної моделі, яка дозволяє кількісно оцінювати ступінь відповідності візуальної сцени заданій ділянці місцевості та приймати обґрунтовані рішення в умовах невизначеності [1–3].

Задача верифікації місцевості полягає у визначенні відповідності поточної візуальної сцени заданій ділянці простору на основі аналізу візуальних ознак та просторових співвідношень між ними. На відміну від задачі розпізнавання окремих об'єктів, верифікація місцевості має системний характер і потребує узгодженого аналізу сцени в цілому з урахуванням можливих змін ракурсу, масштабу, освітлення та спотворень, що виникають під час формування і передавання зображень.

Просторове узгодження сцен є ключовим етапом верифікації місцевості. Воно полягає в оцінюванні просторового перетворення, яке описує взаємне положення еталонної та поточної сцен. Для цього використовується апарат проєктивних перетворень, що дозволяє врахувати зміни масштабу, ракурсу та перспективні спотворення. Отримане перетворення дає можливість перевести координати ознак еталонної сцени у систему координат поточної сцени та оцінити ступінь їх просторової відповідності [4–6].

На основі результатів просторового узгодження вводиться кількісна міра похибки, яка характеризує середнє відхилення між узгодженими ознаками. Ця величина використовується як основа для формування критерію верифікації місцевості. Якщо значення похибки не перевищує заданого порогового рівня, поточна сцена вважається такою, що відповідає заданій ділянці місцевості. В іншому випадку гіпотеза відповідності відхиляється. Таким чином, задача верифікації зводиться до формалізованої процедури прийняття рішення на основі числового критерію [7].

Запропонований критерій верифікації має низку важливих властивостей. По-перше, він є інтерпретованим, оскільки безпосередньо пов'язаний із геометричною похибкою узгодження сцен. По-друге, дозволяє налаштовувати чутливість методу шляхом зміни порогового значення, що є особливо важливим в умовах різної якості вхідних даних. По-третє, критерій може бути використаний для статистичного аналізу результатів верифікації та оцінювання ймовірності помилкових рішень.

Для оцінювання властивостей запропонованої математичної моделі використовується імітаційне моделювання, яке дозволяє дослідити поведінку методу в контрольованих умовах. У межах імітаційних експериментів аналізується вплив рівня шуму, кількості візуальних відповідностей та вибору порогового значення на точність і стійкість верифікації. Такий підхід дозволяє виявити закономірності, які складно отримати лише на основі аналітичних міркувань, а також підтвердити практичну придатність запропонованого методу.

Отримані теоретичні положення та результати імітаційного моделювання свідчать, що запропонований метод верифікації місцевості на основі аналізу візуальних ознак забезпечує стійке та формалізоване прийняття рішень в умовах невизначеності. Запропонований підхід може бути використаний як складова інформаційних технологій обробки візуальних даних у розподілених системах та створює основу для подальшого розвитку методів верифікації просторових сцен.

Важливою особливістю задачі верифікації місцевості є її чутливість до глобальної структури сцени, а не лише до наявності окремих візуальних елементів. Навіть за умови коректного виявлення локальних ознак, помилки у просторовому розташуванні або взаємному співвідношенні цих ознак можуть призводити до хибного підтвердження відповідності місцевості [8, 9]. Тому у запропонованому підході ключову роль відіграє аналіз узгодженості просторової конфігурації ознак, що дозволяє відрізнити дійсну відповідність сцени від випадкового збігу окремих фрагментів зображення.

В дослідженні сформовано покрокову математичну модель верифікації місцевості на основі аналізу візуальних ознак, яка дозволяє формалізувати процес підтвердження відповідності поточної візуальної сцени заданій ділянці місцевості.

Запропонована модель орієнтована на використання її за умов змінних параметрів зйомки, неповноти даних та наявності похибок, що виникають під час формування та передавання візуальної

інформації. Загальну послідовність етапів запропонованого методу верифікації місцевості показано на рис. 1.



РИС. 1. Узагальнена схема методу верифікації місцевості на основі аналізу візуальних ознак

Крок 1. Формування візуальних ознак.

На першому етапі математичної моделі здійснюється формалізація вхідних даних. Розглядаються еталонна ділянка місцевості, для якої відома просторова прив'язка, та поточне зображення сцени, отримане в невідомих або частково відомих умовах зйомки. Для обох зображень формується набір візуальних ознак, що описують локальні або глобальні властивості сцени та слугують базою для подальшого порівняння. При цьому в моделі не накладається обмежень на спосіб формування ознак, що дозволяє використовувати як класичні, так і сучасні методи аналізу зображень.

Позначимо: I_r – еталонне зображення місцевості; I_c – поточне зображення.

Формуємо множини ознак:

$$Fr = \{f_1^r, f_2^r, \dots, f_n^r\}, Fc = \{f_1^c, f_2^c, \dots, f_m^c\}.$$

Крок 2. Зіставлення візуальних ознак.

Другий етап математичної моделі полягає у встановленні відповідностей між візуальними ознаками еталонної та поточної сцен. Цей етап формалізує процес зіставлення ознак та дозволяє виділити підмножину коректних відповідностей, які можуть бути використані для просторового узгодження. Важливою особливістю даного етапу є врахування можливих хибних відповідностей, що зумовлює необхідність подальшої перевірки узгодженості отриманих результатів.

Формується множина відповідностей:

$$M = \{(f_i^r, f_j^c)\}.$$

Зіставлення ознак здійснюється з урахуванням метрики подібності: $d(f_i^r, f_j^c) < \varepsilon$, де ε – порогове значення подібності.

Крок 3. Просторове узгодження.

На третьому етапі моделі здійснюється просторове узгодження сцен шляхом оцінювання перетворення, яке описує взаємне положення еталонної та поточної ділянок місцевості. Для цього використовується апарат проєктивних перетворень, що дозволяє врахувати зміни масштабу, ракурсу та перспективні спотворення. Отримане просторове перетворення є основою для оцінювання ступеня відповідності між сценами та ключовим елементом запропонованої математичної моделі.

Оцінюється матриця просторового перетворення:

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix}.$$

Для кожної відповідності виконується перетворення координат: $x'_c \sim Hx_r$.

Крок 4. Критерій верифікації місцевості.

Заключним етапом математичної моделі є формування критерію верифікації місцевості. На основі аналізу похибок просторового узгодження вводиться кількісна міра відповідності, яка дозволяє прийняти рішення щодо підтвердження або відхилення гіпотези про належність поточної сцени заданій ділянці місцевості. Таким чином, задача верифікації зводиться до формалізованої процедури прийняття рішення на основі числового критерію, що забезпечує відтворюваність та можливість їх подальшого статистичного аналізу.

Обчислюється середня похибка узгодження:

$$E = \frac{1}{|M|} \sum_{k=1}^{|M|} \|x_k^c - Hx_k^r\|.$$

Вводимо критерій верифікації:

$$V = \begin{cases} 1, & E < T, \\ 0, & E \geq T, \end{cases}$$

де T – порогове значення.

Запропонована покрокова математична модель створює основу для проведення імітаційного моделювання та експериментальних досліджень, спрямованих на оцінювання стійкості методу до шумів, неповних даних та змін умов зйомки. Це дозволяє обґрунтувати ефективність запропонованого підходу та підтвердити доцільність його використання у складі інформаційних технологій обробки візуальних даних.

Для перевірки запропонованої математичної моделі було проведено серію імітаційних експериментів, реалізованих у середовищі Python. Метою експериментів було дослідження впливу основних параметрів моделі на точність та стійкість верифікації місцевості.

На рис. 2 показано залежність середньої похибки верифікації від рівня шуму у вхідних даних. Отримані результати свідчать про монотонне зростання похибки зі збільшенням рівня шуму, що підтверджує очікувану поведінку моделі та її стійкість у широкому діапазоні значень.

На рис. 3 показано вплив кількості візуальних відповідей на точність верифікації. Зі збільшенням кількості відповідей спостерігається зменшення середньої похибки, що підтверджує доцільність використання більшої кількості узгоджених ознак для підвищення достовірності верифікації.

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # рівні шуму
5 noise_levels = np.linspace(0, 1.0, 20)
6
7 # імітація похибки верифікації
8 error = 0.5 * noise_levels + 0.05 * np.random.randn(20)
9 error = np.abs(error)
10
11 plt.figure()
12 plt.plot(noise_levels, error, marker='o')
13 plt.xlabel("Рівень шуму")
14 plt.ylabel("Середня похибка верифікації E")
15 plt.grid(True)
16 plt.show()

```

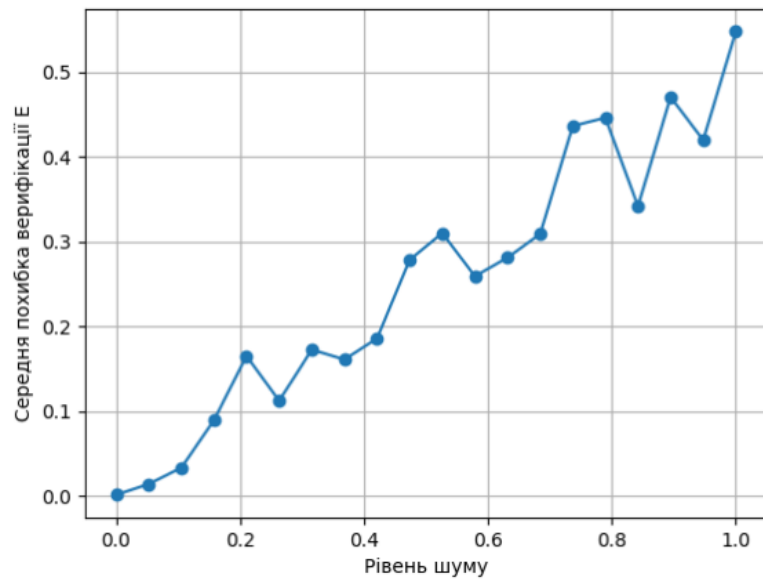


РИС. 2. Залежність середньої похибки верифікації від рівня шуму вхідних даних



РИС. 3. Залежність похибки верифікації від кількості зіставлених візуальних ознак

На рис. 4 показано залежність частки успішної верифікації від порогового значення критерію. Отримана крива демонструє наявність області компромісу, в якій забезпечується баланс між чутливістю та стійкістю прийняття рішення щодо відповідності місцевості.

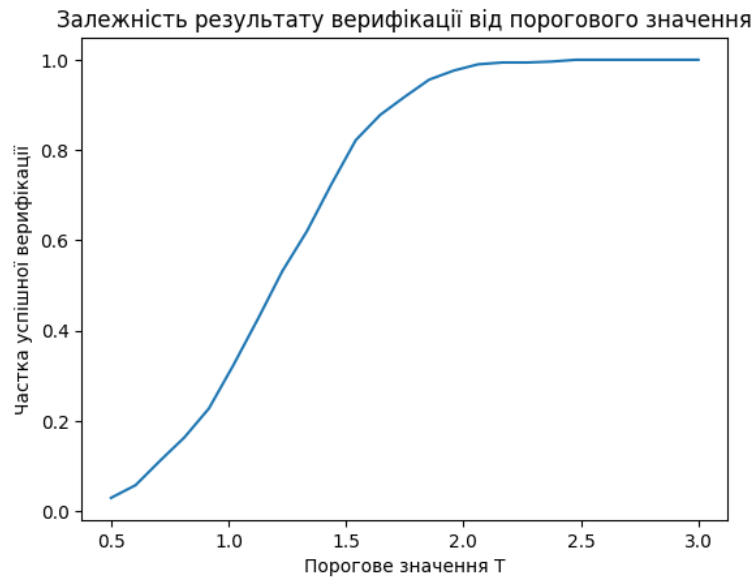


РИС. 4. Залежність ймовірності верифікації місцевості від порогового значення критерію

Для узагальненого аналізу впливу основних параметрів математичної моделі проведено імітаційне моделювання, результати якого представлено у вигляді поверхні середньої похибки верифікації (рис. 5). Поверхня відображає залежність похибки від рівня шуму у вхідних даних та кількості візуальних відповідностей, що дозволяє наочно оцінити області стійкої та нестійкої роботи запропонованого методу.

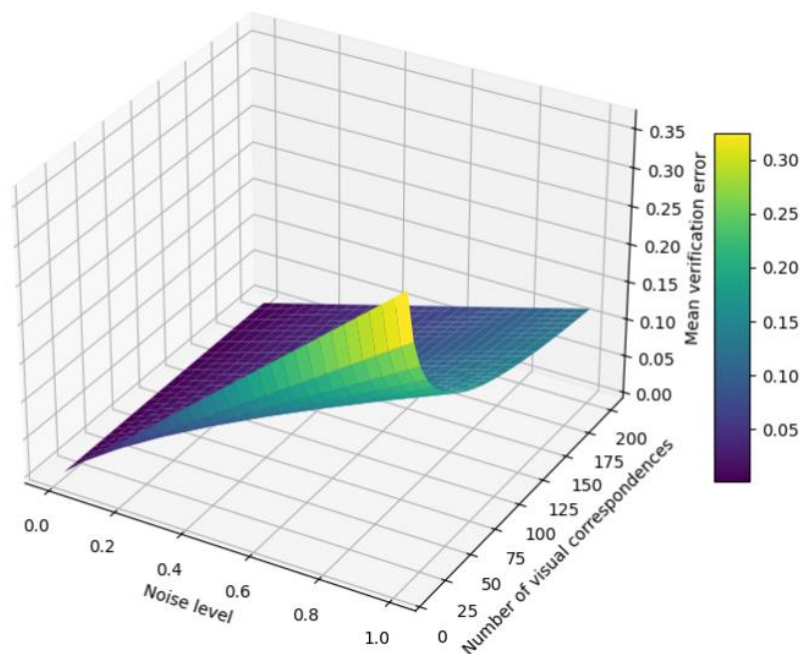


РИС. 5. Поверхня середньої похибки верифікації місцевості залежно від рівня шуму у вхідних даних та кількості візуальних відповідностей

Зі зростанням рівня шуму середня похибка верифікації монотонно збільшується, однак за умови достатньої кількості візуальних відповідей метод зберігає стабільний характер роботи. Отримана поверхня підтверджує можливість компенсації негативного впливу шумів за рахунок збільшення кількості узгоджених ознак, що узгоджується з результатами окремих експериментів.

У результаті імітаційного моделювання встановлено, що середня похибка верифікації зростає зі збільшенням рівня шуму вхідних даних, однак зберігає стабільний характер у широкому діапазоні параметрів. Також показано, що збільшення кількості візуальних відповідей суттєво підвищує стійкість методу. Аналіз впливу порогового значення критерію верифікації підтверджує можливість керування компромісом між чутливістю та достовірністю прийняття рішення.

Значний вплив на результати верифікації має неповнота та неоднорідність вхідних даних, що є характерною рисою реальних інформаційних систем. Частина візуальних ознак може бути відсутньою або спотвореною внаслідок змін умов зйомки, обмежень огляду чи якості передавання даних. Запропонована математична модель враховує ці фактори за рахунок усереднення похибок узгодження та використання агрегованого критерію, що зменшує вплив окремих аномальних відповідей на кінцевий результат верифікації.

Запропонований критерій верифікації дозволяє не лише приймати рішення щодо відповідності місцевості, а й аналізувати поведінку методу за зміни параметрів моделі. Зокрема, варіювання порогового значення дозволяє дослідити компроміс між чутливістю та стійкістю верифікації, що є важливим з точки зору адаптації методу до різних умов експлуатації. Такий підхід відкриває можливість подальшого розширення моделі шляхом введення адаптивних або ймовірнісних критеріїв прийняття рішень.

Запропонований метод верифікації місцевості поєднує геометричну інтерпретованість, формалізовану математичну основу та можливість практичної реалізації у складі інформаційних технологій обробки візуальних даних. Теоретичні положення, покладені в основу методу, створюють передумови для подальшого розвитку підходів до верифікації просторових сцен та їх інтеграції у складні розподілені інформаційні системи.

Висновки. У статті запропоновано метод верифікації місцевості на основі аналізу візуальних ознак, який дозволяє формалізувати процес підтвердження відповідності поточної візуальної сцени заданій ділянці простору. Запропонований підхід розглядає задачу верифікації як інформаційну процедуру прийняття рішення, що ґрунтується на просторовому узгодженні візуальних даних та кількісній оцінці похибки відповідності.

Розроблено покрокову математичну модель, яка описує основні етапи верифікації місцевості, зокрема формування візуальних ознак, встановлення відповідей, оцінювання просторового перетворення та введення формалізованого критерію прийняття рішення. Особливістю запропонованої моделі є її незалежність від конкретних алгоритмів аналізу зображень, що забезпечує універсальність та можливість адаптації до різних умов використання.

За допомогою імітаційного моделювання проведено експериментальну перевірку властивостей запропонованої математичної моделі. Отримані результати підтверджують стійкість методу до шумів, неповноти даних та змін кількості візуальних відповідей. Показано, що зі збільшенням кількості узгоджених ознак зменшується похибка верифікації, а вибір порогового значення критерію істотно впливає на баланс між чутливістю та стійкістю прийняття рішення.

Результати дослідження свідчать про доцільність використання запропонованого методу в складі інформаційних технологій обробки візуальних даних у розподілених системах. Запропонований підхід створює основу для подальшого розвитку методів верифікації просторових сцен, зокрема шляхом розширення математичної моделі, урахування додаткових джерел інформації та адаптації критеріїв прийняття рішень до умов функціонування конкретних систем.

Авторські внески: Юдіна Л.Г. – методологія, програмна реалізація, проведення експериментів, аналіз результатів, редагування; Кашкевич С.О. – концептуалізація, керівництво, формальний аналіз, узагальнення.

Список літератури

1. Kashkevich S. Decision support systems: mathematical support. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, 2025. 202. <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-13-9>
2. Tamer K.A., Sova O., Shaposhnikova O., Yashchenok V., Stanovska I., Shostak S., Rudenko O., Petruk S., Matsyi O., Kashkevich S. Development of a solution search method using a combined bio-inspired algorithm. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, No. 4 (127). P. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298205>
3. Mohammed B.A., Stanovska I., Kashkevich S., Lebedynskiy A., Vakulenko Y., Protas N., Klyuchak O., Lastivka O., Semeniuk A., Kivshar O. Development of a methodological approach for assessing the condition of complex organizational and technical systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 2, No. 3 (134). P. 47–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.326468>
4. Lysenko O., Tachinina O., Ponomarenko S., Guida O., Kutieпов V. Two-Channel Precision Regulator for Electric Drive of Optical Fiber Winding Mechanism of Avionics Sensory Elements. *Lecture Notes in Networks and Systems Open source preview*, 2025. P. 298–310.
5. Ластівка О.І., Нечипорук О.П. Дослідження ефективності модуляційних методів для забезпечення якості передачі даних в інформаційних мережах. *Технічна інженерія*. 2025. №2 (96). С. 101–107. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-101-107](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-101-107)
6. Pozna C., Precup R.-E., Horváth E., Petriu E.M. Hybrid Particle Filter–Particle Swarm Optimization Algorithm and Application to Fuzzy Controlled Servo Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2022.Vol. 30, No. 10. P. 4286–4297. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2022.3146986>.
7. Terzi D. On the Solution of the Traveling Salesman Problem by a Modification of the Hungarian Method. *Cybernetics and Computer Technologies*. 2025. 4. P. 5–11. <https://doi.org/10.34229/2707-451X.25.4.1>
8. Плехова Г.А., Неронов С.М., Костікова М.В., Кашкевич С.О. Удосконалення моделі безпечної маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах. *ХНУРЕ. Біоніка інтелекту*. 2024. № 1 (100). С. 50–57. [https://doi.org/10.30837/bi.2024.1\(100\).07](https://doi.org/10.30837/bi.2024.1(100).07)
9. Yudina L.H., Nechiporuk O.P. Theoretical aspects of information exchange in unmanned aerial vehicle networks. «Сучасні тенденції розвитку системного програмування», науково-практична конференція, 20-21 листопада 2025 р. Київ, 2025. С. 10.

Received/Одержано 23.01.2026

Accepted/Прийнято 26.05.2026

Published/Надруковано 01.06.2026