

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-101>
УДК 004.89:681.5

ЧЕСАНОВСЬКИЙ ІВАН

Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького

<https://orcid.org/0000-0002-8161-3276>

e-mail: chesanov.i@gmail.com

МОДЕЛЬ ІНТЕГРАЦІЇ ТА СТРУКТУРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

В роботі наведено результати досліджень щодо розробки моделі динамічної оптимізації складних технічних систем побудованих на основі багаторівневої кіберфізичної архітектури. На прикладі сучасних систем моніторингу показано, що за рахунок поєднання широких функціональних можливостей і високої структурної складності стає можливим застосування динамічних алгоритмів оптимізації, які більш повно враховують внутрішній стан системи і зовнішні умови її функціонування. Запропоновано та обґрунтовано модель багатокритеріальної оптимізації на основі методу ранжування конкурентних конфігурацій системи в умовах неформалізованого вираження критеріїв оптимальності.

Ключові слова: складні технічні системи, інтеграція, оптимізація, кіберфізичні системи, моніторинг, сенсор.

CHESANOVSKIY IVAN

Bohdan Khmelnytskyi National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine, Khmelnytskyi

A MODEL OF INTEGRATION AND STRUCTURAL OPTIMIZATION OF CYBER-PHYSICAL SYSTEM ELEMENTS

The article presents the results of a study aimed at developing a model for the dynamic structural optimization of cyber-physical systems (CPS), which are built upon complex multi-level architectures integrating physical components with distributed computational processes. Using the example of modern monitoring systems in border security applications, it is demonstrated that the combination of multifunctional and structurally complex subsystems enables the implementation of adaptive optimization algorithms that more accurately account for both the internal system state and external operational conditions.

The proposed model is based on a multi-criteria approach that includes the ranking of competitive system configurations under conditions of incomplete or non-formalized information regarding optimality criteria. The study emphasizes the need to reconsider CPS optimization principles due to the high level of component interaction, dynamic load redistribution, and the integration of modern data analytics and machine learning algorithms. These factors result in emergent properties, nonlinear dependencies, and the need for structural reconfiguration of the system in response to changes in the operational environment.

The optimization model takes into account not only the activation of individual sensors or network nodes, but also evaluates resource consumption, system reliability, detection accuracy, and response time. The system's performance is assessed under varying external conditions such as time of day and weather factors, necessitating dynamic adaptation to maintain specified operational parameters. The mathematical formalization includes the definition of structural and functional variables, objective functions, and probabilistic constraints on the effectiveness of sensors and communication subsystems.

The developed optimization model aims to minimize the average resource expenditures while satisfying constraints related to system performance and continuity of monitoring coverage. The proposed multi-criteria ranking approach enables the integration of diverse criteria — quantitative, qualitative, and linguistic — through normalization and projection into a unified analytical space. The paper provides examples of system configuration options and simulation results that demonstrate how optimal system states can be achieved under different operating conditions.

The proposed approach is particularly relevant to the design of CPS for border security applications, where complex technical systems must rapidly adapt to threats and environmental changes. Future research will be focused on solving inverse problems — determining the set of admissible system states based on constraints in the space of advantages and losses — which will enhance the adaptability and resilience of CPS architectures.

Keywords: complex technical systems, integration, optimization, cyber-physical systems, monitoring, sensor.

Стаття надійшла до редакції / Received 26.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Вступ

Поява та розвиток нових концепцій побудови складних технічних систем (СТС) [1-2], що поєднують в собі безліч різнотипних фізичних та обчислювальних (кібернетичних) елементів, обумовлює необхідність пошуку більш ефективних підходів їх інтеграції. Особливо актуальною стає ця проблема при частковій надмірності функціональних наборів окремих елементів, що відкриває потенційні можливості до їх перерозподілу в мережевій структурі і вимагає іншого підходу при оптимізації. Це особливо характерно для відносно нової концепції побудови СТС – кіберфізичних систем (КФС) [3-5] в яких екстремальна ефективність досягається за рахунок впровадження моделей розподілених обчислень та декількох рівнів інформаційної аналітики. Маючи гнучку архітектуру сучасні КФС можуть динамічно змінювати розподіл навантаження між окремими елементами та вузлами в залежності від наявних ресурсів і умов функціонування [6]. Проте, перерозподіл навантаження і зміна функціонального набору також вимагають оперативної оптимізації структури СТС, що є надзвичайно складною задачею, оскільки належить до класу багатокритеріальних задач оптимізації [7], простір розв'язку якої містить цілі набори конкуруючих, часто взаємопов'язаних критеріїв оптимальності окремих підсистем. Додатковою проблемою в оптимізації КФС, є глибока інтеграція інформаційно-аналітичних інструментів [8], які значно розширюють функціональні

можливості але ускладнюють управління на рівні процесів внутрішньо-системної організації через їх нелінійну взаємодію, емерджентність та здатність адаптуватися до зовнішніх умов.

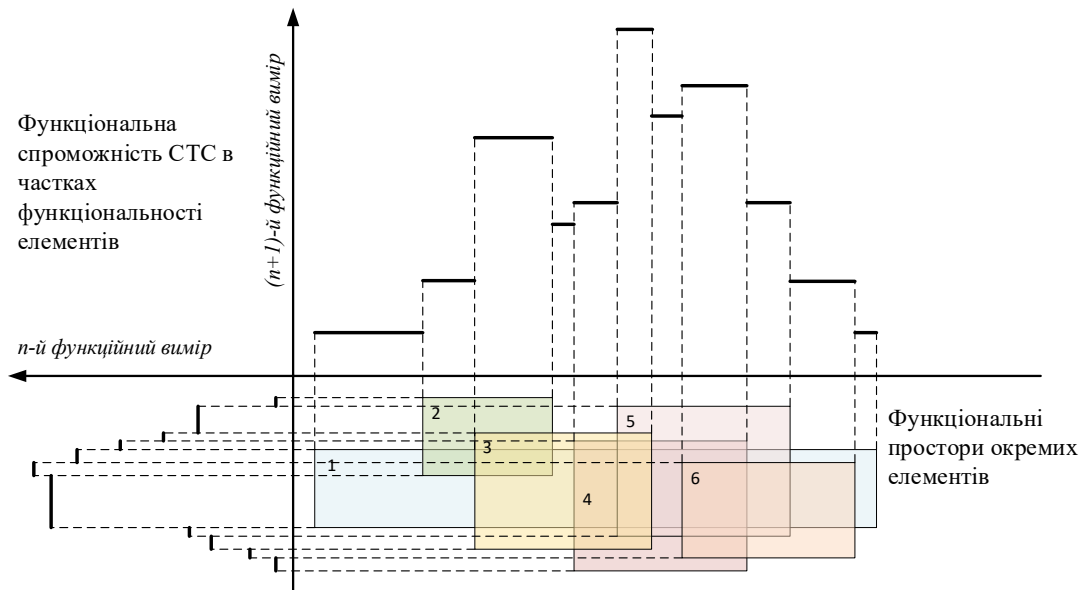


Рис. 1. Функціональні набори елементів СТС

На рис. 1 показано приклад формування функціональних наборів системи, що утворюються в наслідок взаємодії окремих підсистем в розрізі різних функціональних вимірів. Прикладом такої взаємодії може бути синергетичний ефект в мультисенсорній системі моніторингу [6], де рішення про стан систем приймається не на основі стану окремих сенсорів а в наслідок комплексного аналізу стану системи в цілому із застосуванням складних аналітичних інструментів, алгоритмів машинного навчання, тощо, які забезпечують розподілене автономне управління системою та балансування навантажень підсистем. В наслідок цього, в системі існує безліч можливих конфігурацій, що відрізняються розподілом навантажень і дають змогу досягти заданих показників ефективності як для системи в цілому так і для окремих елементів (підсистем). В теорії складних технічних систем відомі підходи динамічної реконфігурації (адаптації) систем, що дають змогу на основі різних методів, в тому числі багатокритеріальної оптимізації, досягати оптимальних показників ефективності СТС при зміні умов функціонування, але лише в межах закладених на етапі проектування моделей [9]. Сучасні СТС передбачають певну автономність управління за рахунок алгоритмів машинного навчання, що значно розширює можливості структурної і функційної оптимізації, але не може бути повністю визначено моделлю на етапі проектування, або завчасно на етапі експлуатації.

Аналіз досліджень та публікацій

Система інформаційно-технічного забезпечення охорони державного кордону України [5] є прикладом сучасної СТС, що перебуває на етапі розбудови. Відповідно до існуючої концепції [10] цей процес відбуваються шляхом нарощення елементів технічної бази збору інформації з одночасним додаванням програмних сервісів її аналізу – кластеризації, класифікації, узагальнення, прогнозування, тощо [5]. Все це супроводжується комплексуванням кібернетичних та технічних елементів в різних моделях мережевої інфраструктури. На сьогодні існуюча система включає різні інфраструктурні рішення [11] (системи відеоспостереження, інтелектуальні бар'єри, детектори руху), мобільні засоби моніторингу [12] (безпілотні літальні апарати, патрульні транспортні засоби), а також автоматизовані системи обробки даних [13] (системи відео аналітики, системи оцінки та прогнозування ризиків, системи підтримки прийняття рішень). Такий широкий спектр засобів, поєднаних в єдину систему, потребує принципово іншого підходу оптимізації як на етапі проектування, так і на етапі експлуатації. Описані в роботах [7], [9], [13] методи дають змогу оптимізувати СТС при заданих функціональних можливостях елементів і відомих (прогнозованих) їх навантаженнях. Проте, як показано в [5] при застосуванні моделей розподілених обчислень і мережевої структури, навантаження і функції окремих елементів можуть бути перерозподілені. Це дає змогу балансувати навантаження в системі, проте вимагає іншого підходу при оптимізації, який передбачає не лише зміну параметрів функціонування а і зміну конфігурації системи під поточні потреби та умови.

Метою роботи є: розробка та обґрунтування моделі інтеграції компонент та методу структурної оптимізації кіберфізичних систем.

Виклад основного матеріалу

Основу будь-якої системи моніторингу утворює мережа сенсорів [6], засобів спостереження, елементи комунікаційної інфраструктури та локальні обчислювальні вузли. Простір потенційних рішень при оптимізації таких систем має включати можливі конфігурації, які одночасно забезпечують повноту зони контролю, потребують мінімальних витрат ресурсів та забезпечують максимальну ефективність виявлення загроз. Крім того, процес оптимізації має передбачати можливість довільного рівня формалізації різних

критеріїв та показників. Виходячи з цього, метою оптимізації є пошук оптимальної структури (набір та зв'язки компонентів) і налаштування робочих параметрів мережі, щоб задовільнити цільову функцію, яка спрямована на забезпечення заданого рівня оперативності виявлення та обробки інформації про потенційні загрози в зоні контролю за мінімальних витрат ресурсів і з урахуванням експлуатаційних обмежень. Це має досягатись через вибір (активацію) оптимальної кількості сенсорів, датчиків та номінального завантаження вузлів інформаційно-комунікаційної інфраструктури. Оптимальною структурою системи вважається такий набір елементів, що забезпечує максимальні функціональні можливості (достовірність, чутливість, площа надійного покриття, тощо) при мінімальній витраті ресурсів (кількість сенсорів, завантаження обчислювальних вузлів) та заданих параметрах мережі зв'язку (пропускна здатність, затримка, потужність алгоритмів попередньої обробки).

Враховуючи, що окремі сенсори фізичного рівня в залежності від пори доби та погодних умов мають різну ефективність, введемо змінні: T – множина дискретних часових періодів (денний, нічний, сутінки, тощо) і W – множина погодних умов (наприклад, ясна, хмарна, дощова, снігова).

Для кожного сенсора i ефективність роботи (ймовірність виявлення) залежить від його налаштувань u_i^s , а також від періоду $t \in T$ і погодних умов $\omega \in W$. Відповідно, введемо параметр:

$$p_i^u(u_i^s, t, \omega), \quad (1)$$

що описує внесок сенсора i у ймовірність виявлення об'єкта в умовах (t, ω) .

Подібним чином, деякі параметри системи зв'язку можуть змінюватись в залежності від t та ω , але за стаціонарних умов цими змінами можна знехтувати і основну увагу зосередити на сенсорах як критичному елементі виявлення.

В якості змінних, при побудові моделі, доцільно використати параметри, що характеризують структуру системи та налаштування елементів. Структурні змінні:

- для фізичного рівня

$$x_i^s \in \{1, 0\}, i \in I^s \quad (2)$$

де $x_i^s = 1$ – сенсор розміщено і активовано, $x_i^s = 0$ – сенсор не активовано;

- для комунікаційного рівня

$$x_j^c \in \{1, 0\}, j \in I^c \quad (3)$$

де $x_j^c = 1$ – зв'язок з комунікаційним вузлом j встановлено, $x_j^c = 0$ – зв'язок з комунікаційним вузлом j не встановлено;

- модель низького рівня аналітики

$$y_{i,j} \in \{1, 0\}, \quad (4)$$

де $y_{i,j} = 1$ – обчислювальні ресурси сенсора i на вимогу вузла j задіяно, $y_{i,j} = 0$ – обчислювальні ресурси сенсора не задіяно.

Для обмеження можливості виникнення недопустимих комбінацій змінних вводяться логічні співвідношення:

$$y_{i,j} \leq x_i^s, y_{i,j} \leq x_j^c, \forall i \in I^s, \forall j \in I^c. \quad (5)$$

Функціональні змінні можуть бути виражені у вигляді параметрів засобів фізичного рівня (чутливість, режим, сектор огляду, тощо) та для елементів комунікаційного рівня (пропускна здатність, тривалість, час затримки). В загальному, функціональні змінні для фізичного і комунікаційного рівня мають вигляд:

$$u_i^s \in [u_i^{s, \min}, u_i^{s, \max}], \forall i \in I^s, \quad (6)$$

$$u_j^c \in [u_j^{c, \min}, u_j^{c, \max}], \forall j \in I^c. \quad (7)$$

З метою постановки оптимізаційної задачі слід ввести ряд показників умовних витрат ресурсів, що можуть виражатись в різних формах (вартість, частка від наявного ресурсу, питома вага витрат, тощо). Враховуючи реальні обмеження ресурсів в різних номенклатурах засобів, комунікаційних та інфраструктурних спроможностях введемо показники питомої вартості витрат: b_i^s – питома вартість встановлення та експлуатації сенсора i ; b_j^c – питома вартість використання комунікаційного елемента j ; $b_{i,j}$ – питома вартість організації обчислень ресурсами i сенсора в інтересах вузла j .

Ефективність кожного елемента розподіленої системи буде оцінюватись за наступними показниками: $p_i^s(u_i^s, t, \omega)$ – ймовірність виявлення події (спрацювання) сенсором i при налаштуванні параметрів u_i^s у часовий інтервал (момент часу) t за погодних умов ω ; $p_j^c(u_j^c)$ – внесок комунікаційного елемента j у первинну обробку даних (можна вважати сталим або залежним від інших умов, за потреби); $p_{i,j}$ – ефективність обробки та передачі інформації між сенсором i та вузлом j .

Враховуючи мережеву структуру системи, в якій множина сенсорів інтегруються через мережу вузлів, які є елементами інформаційно-комунікаційної (обчислювальної) інфраструктури другого рівня, що є елементом наступного рівня і т.д., доцільно розділити зону покриття на регіони r , сукупність яких утворює суцільну зону покриття R . Це дає змогу ввести ряд обмежень на комплексні показники системи:

1. Суцільність покриття – для кожного регіону r має бути забезпечено мінімальне покриття:

$$\sum_{i \in I^s} a_{i,r} x_i^s \geq 1, \forall r \in R, \quad (8)$$

де $a_{i,r}$ – коефіцієнт, що показує, на скільки надійно сенсор i може забезпечити покриття регіону r .

2. Надійність виявлення – забезпечення мінімально необхідної сумарної ймовірності виявлення для всієї системи (або для кожного регіону) у часовий період t та за погодних умов ω :

$$\sum_{i \in I^s} a_{i,r} p_i^s(u_i^s, t, \omega) x_i^s \geq P(t, \omega)_{\min} \quad (9)$$

Поєднання цих обмежень дає змогу сформулювати критерій оптимальності – забезпечення максимальної середньої ймовірності виявлення при заданій максимально допустимій питомій вартості $B_{\max}$. При постановці оптимізаційної задачі за даним критерієм, основною метою є досягнення заданих показників ефективності при мінімальній витраті ресурсів. Може застосовуватись декілька принципових підходів та обмежень при формулюванні цільової функції, проте, простір пошуку рішень завжди має обмежуватись раціональними співвідношеннями між значимістю окремого показника ефективності і ціни його досягнення зусиллями всіх складових СТС. Цільова функція, що мінімізує сумарні питомі витрати на застосування елементів першого і другого рівнів системи моніторингу має вигляд:

$$\min_{i^s, j^c} Z = \sum_{i \in I^s} b_i^s x_i^s + \sum_{j \in I^c} b_j^c x_j^c + \sum_{i \in I^s} \sum_{j \in I^c} b_{i,j} y_{i,j}. \quad (10)$$

Пошук розв'язку цільової функції (10) здійснюється за виконання низки обмежень:

1. Обмеження на мінімальну ефективність виявлення (для кожного часового періоду та різних погодних умов):

$$\sum_{i \in I^s} a_{i,r} p_i^s(u_i^s, t, \omega) x_i^s + \sum_{j \in I^c} p_j^c(u_j^c) x_j^c + \sum_{i \in I^s} \sum_{j \in I^c} p_{i,j} y_{i,j} \geq P(t, \omega)_{\min} \quad (11)$$

Для кожного регіону r , для всіх $t \in T$ та $\omega \in W$ сумарна ймовірність виявлення має бути не менша за $P(t, \omega)_{\min}$. Реальне об'єднання ефективностей може бути нелінійним (наприклад, через комплементарність або надлишковість сенсорів), але для лінійної апроксимації може бути використана сума.

2. Обмеження на максимально допустимі витрати ресурсів:

$$\sum_{i \in I^s} b_i^s x_i^s + \sum_{j \in I^c} b_j^c x_j^c + \sum_{i \in I^s} \sum_{j \in I^c} b_{i,j} y_{i,j} \leq B_{\max} \quad (12)$$

Отримана цільова функція дає змогу оптимізувати СТС враховуючи дискретну динаміку ефективності роботи сенсорів фізичного рівня та динаміку стану інформаційно-комунікаційної системи.

В табл. 1, приведено декілька варіантів внутрішнього стану системи, що забезпечують досягнення цілей оптимізації при зміні зовнішніх умов.

Таблиця 1

Варіанти конфігурації системи

Показник	Значення								
	8:00			12:00			20:00		
Час доби									
Зовнішні умови, ω	1	0,6	0,4	1	0,7	0,3	1	0,8	0,5
Активация сенсорів, x	00100	00110	01110	11011	11001	10111	11010	01010	11111
	00110	01110	01110	10001	11011	11110	11100	11111	11111
Значення цільової функції, Z	232	370	420	220	320	382	305	435	476
Обмеження, $P_{\min}(t, \omega)$	0,963	0,876	0,662	0,961	0,922	0,603	0,959	0,892	0,703

Як видно з табл. 1, на значення окремої цільової функції впливає велика кількість зовнішніх чинників, що значно ускладнює задачу оптимізації лінійними методами і вимагає іншого підходу якщо є потреба динамічного управління ефективністю системи. Тим більше, з огляду на простоту лінійних моделей, вони можуть бути достатньо ефективними лише для систем малої розмірності. У випадку СТС такі моделі можуть бути застосовані як допоміжні на найнижчих рівнях реалізації системи, наприклад, для раціоналізації розподілу (активації) сенсорів на заданій площі за умови достатньої апріорної визначеності. Якщо ж, окрім мінімізації питомих витрат (10), застосовуються інші критерії, такі як надійність системи, час відгуку, затримки в комунікаціях тощо, модель має бути розширена до багатокритеріальної оптимізації. У випадку СТС, через інтеграцію в одній архітектурі великої кількості різномірних підсистем (технічних, інформаційних, роботизованих і т.д.) спроби звести стани до одного простору виглядають малоефективними, а тому необхідно шукати нові підходи багатокритеріальної оптимізації для цього класу систем. Одним із таких підходів є багатокритеріальне ранжування. Цей підхід дає змогу, в умовах наявності неоднорідної інформації (точкові заміри і наближені значення параметрів, неоднакові інтервали їх замірів, точність оцінки статистичних законів розподілу) знаходити зважені рішення щодо оптимальної структури СТС навіть за наявності частково формалізованих, або не формалізованих критеріїв.

Для математичного формулювання задачі, введемо ряд позначень: $X = \{x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ - множина всіх можливих варіантів системи; $Z\{x_i\} = \{Z_1(x_i), Z_2(x_i), \dots, Z_m(x_i)\}$ - векторний критерій, що характеризує конфігурацію системи x_i ; $Z_m(x_i)$ - частковий критерій якості, що характеризує систему x_i ; $A = \{\gamma_j\}$, $j = 1, \dots, m$ - множина нормованих вагових коефіцієнтів; $\phi 1_m(Z_m(x_k), Z_m(x_l))$ - оцінка відносної переваги системи в конфігурації x_k над системою в конфігурації x_l по критерію Z_m ; $\phi 2_m(x_k, x_l)$ - функція інтенсивності переваги системи в конфігурації x_k над системою в конфігурації x_l по критерію Z_m ; $L_m(x_k, x_l)$ - функція інтенсивності програшів системи в конфігурації x_k системи в конфігурації x_l по критерію Z_m ; $W_m(Z(x_i))$ - відносна перевага конфігурації системи x_i порівняно з іншими конфігураціями системи по критерію Z_m ; $D(Z(x_i))$ - функція інтенсивності виграшу (переваги) конфігурації системи x_i порівняно з іншими конфігураціями системи по

векторному критерію Z ; $\bar{E}_j(x_k)$ - середня інтенсивність програшів системи в конфігурації x_k по критерію Z_m відносно інших конфігурацій; $\bar{H}_j(x_k)$ - середня інтенсивність переваг системи в конфігурації x_k по критерію Z_m відносно інших конфігурацій; $d_i(x)$ - середня відстань від оптимального значення в просторі інтенсивностей програшів та переваг конфігурації системи.

Враховуючи введені поняття багатокритеріальна оптимізація системи полягає в наступному. Із відомої множини можливих конфігурацій системи $X = \{x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, що сформована на основі векторного критерію $Z\{x_i\} = \{Z_1(x_i), Z_2(x_i), \dots, Z_m(x_i)\}$ необхідно знайти конфігурацію, що відповідає найкращій зваженій оцінці в просторі інтенсивностей програшів та переваг

$$\min_{x_i \in X} \sum_{Z_j \in Z} [d(Z_j(x_i)) \cdot \gamma_j] \quad (13)$$

Враховуючи (13), оптимізаційна задача розв'язується в два етапи. На першому етапі формуються набори конфігурацій системи, що відповідають вимогам ключового критерію оптимальності за основним показником ефективності. Будемо вважати, що в отриманому просторі станів СТС показники ефективності за неключовим критерієм розподілені не монотонно і лінійно незалежні. Це означає, що збільшення чи зменшення ефективності за ключовим критерієм може бути досягнуто різними комбінаціями показників за іншими критеріями.

Ефективність застосування багатокритеріального підходу багато в чому залежить від якості та точності сформованих часткових критеріїв. Для визначення оптимальної конфігурації системи за окремим критерієм можна застосувати один із класичних методів оптимізації. У випадку системи моніторингу в охороні кордону, вирішенням оптимізаційної задачі буде оптимальний набір та просторовий розподіл сенсорів, що забезпечують максимальну ймовірність виявлення порушень в зоні контролю при мінімальних витратах ресурсів і рівномірному розподілі ймовірності виявлення у всій зоні контролю. Оскільки сенсори поєднані в мережу через систему комунікаційних вузлів, активація або зміна чутливості окремих сенсорів може відбуватись динамічно. В залежності від зовнішніх умов (пора доби, погодні умови, тощо) ефективність системи змінюється, а тому розв'язок оптимізаційної задачі має містити цілі набори конкурентних конфігурацій системи. Для вибору однієї з них, необхідно розглядати додаткові критерії і вирішувати багатокритеріальну оптимізаційну задачу. Основою її розв'язку є набір критеріїв та обчислювальні моделі для динамічної оцінки поточних значень показників окремих критеріїв.

В якості прикладу розглянемо набір декількох конфігурацій системи моніторингу. Припустимо, що в ході розв'язку низки однокритеріальних оптимізаційних задач [14] був отриманий набір конфігурацій системи, які мають різну ефективність за чотирма критеріями (табл. 2). Як це зазвичай буває на практиці, задані критерії характеризуються показниками різного ступеня формалізації (кількісними, якісними, лінгвістичними, тощо).

Таблиця 2

Варіанти конфігурації системи

Критерій	Варіант конфігурації системи				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Ймовірність виявлення - Z_1	0,78	0,76	0,83	0,85	0,79
Вартість (у.о.) - Z_2	900	700	1200	1300	1100
Рівень автоматизації системи - Z_3	нижче середн.	низька	вище середн.	середня	висока
Швидкість реакції (с) - Z_4	50	100	10	30	5

Необхідно здійснити вибір з п'яти варіантів конфігурації системи, що відрізняються набором елементів, рівнем автоматизації та набором додаткових функцій. Все це впливає на ефективність системи в заданій конфігурації за одним із чотирьох критеріїв $Z_1 - Z_4$. Ускладнює задачу те, що критерії задані в різній формі: Z_1 - ймовірність виявлення, формалізований, кількісний в діапазоні $[0, 1]$; Z_2 - вартість, формалізований, кількісний в діапазоні $[0, +\infty)$; Z_3 - автоматизація, неформалізований, лінгвістичний (формалізація: «погано» - 1, «нижче середнього» - 2, «середня» - 3, «вище середнього» - 4, «висока» - 5); Z_4 - швидкість реакції формалізований, кількісний в діапазоні $[0, +\infty)$. Окрім того, що критерії (табл. 2) характеризуються неоднорідними величинами, вони ще й містять неузгодженість в значеннях. Основою цієї неузгодженості є різний фізичний зміст показників і як наслідок різні «напрямки» їх оптимізації. Для деяких критеріїв бажаною є максимізація значень (Z_1, Z_3), для інших мінімізація (Z_2, Z_4), що має враховуватись при формуванні багатокритеріальної оптимізаційної моделі.

Обчислення даної функції дає змогу знайти конфігурацію системи, що має найкращу зважену оцінку по всьому векторному критерію. Алгоритм її обчислення включає наступні етапи: формування множини x_i всіх і можливих конфігурацій системи; обчислення (оцінка) та формалізація показників ефективності за векторним критерієм $Z\{x_i\}$; нормалізація значень вектору $\{Z_1(x_i), Z_2(x_i), \dots, Z_m(x_i)\}$; обчислення відносних оцінок переваг конфігурацій $\varphi 1_m(x_k, x_l)$ та їх інтенсивностей $\varphi 2_m(x_k, x_l)$; обчислення відносних оцінок програшів конфігурацій $L_m(x_k, x_l)$; обчислення проєкцій $\varphi_m(x_k, x_l)$ в просторі інтенсивностей переваг і

програшів; визначення d_{min} та вибір найвигіднішої конфігурації системи.

Кожен критерій характеризує певну локальну якість альтернативної конфігурації системи, наприклад, ймовірність виявлення, надійність, вартість, швидкодію тощо. Якщо критерії не виражаються в однакових одиницях виміру, то їх приводять до безрозмірного вигляду з однаковими шкалами виміру. Це можна робити простим способом – шляхом ділення значення кожного критерію на одиницю відповідного масштабу, проте ефективними є складніші способи, наприклад, шляхом введення функції

$$f_i(x) = \frac{Z_i(x) - Z_i^{max}}{Z_i^{max} - Z_i^{min}}. \quad (14)$$

При нормалізації за (14), внесок «локальної якості» окремого критерію в «глобальну якість» залежить від того на скільки сильно змінюється локальна якість на допустимій множині. Такий підхід при нормуванні є частиною принципу рівномірної оптимальності і є доброю основою для обчислення функцій оцінки переваг та інтенсивності переваг різних конфігурацій системи в межах окремого показника. З цією метою, для пари конфігурацій (x_k, x_l) обчислюється функція відносної переваги системи в конфігурації x_k над конфігурацією системи x_l по критерію Z_m

$$\phi_{1_m}(Z(x_k), Z(x_l)) = \begin{cases} \frac{Z_m(x_k) - Z_m(x_l)}{Z_m^{max} - Z_m^{min}}, & Z_m(x_k) - Z_m(x_l) > 0, \\ 0, & Z_m(x_k) - Z_m(x_l) \leq 0. \end{cases} \quad (15)$$

Нормування значень по (Z_m^{max}, Z_m^{min}) є одним із можливих варіантів, що в даному випадку (побудова сенсорних мереж) і в даній постановці є зручним, оскільки немає необхідності враховувати знак результату і отримані значення належать інтервалу $[0, 1]$. Це обумовлено тим, що критеріями якості є різномірні величини з масштабами значень, що відрізняються на декілька порядків (ймовірність, вартість, площа покриття, рівномірність покриття, тощо), але відносна варіація значень має різні порядки. Через це, нормування по діапазону значень (за виключенням випадків, коли значення змінюються від нуля) буде не рівнозначним «локальному» вкладу. Формула (15) отримана з припущення, що бажаною є максимізація значень показників за частковими критеріями. В іншому випадку (15) перетворюється до вигляду

$$\phi_{1_m}(Z(x_k), Z(x_l)) = \begin{cases} -\frac{(Z_m(x_k) - Z_m(x_l))}{Z_m^{max} - Z_m^{min}}, & Z_m(x_k) - Z_m(x_l) \leq 0, \\ 0, & Z_m(x_k) - Z_m(x_l) > 0. \end{cases} \quad (16)$$

Результати розрахунку відносної оцінки переваги системи в конфігурації x_k над системою в конфігурації x_l по критерію $Z_m(x)$ приведено в табл. 3.

Таблиця 3

Нормалізовані значення відносної оцінки переваг конфігурацій

k	l																			
	$\phi_{1_1}(Z(x_k), Z(x_l))$					$\phi_{1_2}(Z(x_k), Z(x_l))$					$\phi_{1_3}(Z(x_k), Z(x_l))$					$\phi_{1_4}(Z(x_k), Z(x_l))$				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	.	0,03	0,00	0,00	0,00	.	0,00	0,50	0,67	0,33	.	0,50	0,00	0,00	0,00	.	0,53	0,00	0,00	0,00
2	0,00	.	0,00	0,00	0,00	0,33	.	0,83	1,00	0,67	0,00	.	0,00	0,00	0,00	0,00	.	0,00	0,00	0,00
3	0,06	0,08	.	0,00	0,05	0,00	0,00	.	0,17	0,00	0,50	0,75	.	0,25	0,00	0,42	0,95	.	0,21	0,00
4	0,08	0,11	0,02	.	0,07	0,00	0,00	0,00	.	0,00	0,33	0,67	0,00	.	0,00	0,21	0,74	0,00	.	0,00
5	0,01	0,04	0,00	0,00	.	0,00	0,00	0,17	0,33	.	0,60	0,80	0,20	0,40	.	0,47	1,00	0,05	0,26	.

Значення інтенсивності переваги конфігурації x_k над системою в конфігурації x_l по критерію $Z_m(x)$ показує наскільки інтенсивною є перевага відібраних конфігурацій в межах одного критерію відносно переваг відібраних конфігурацій за іншими критеріями. Обчислюються інтенсивності переваг конфігурацій системи за формулою:

$$\phi_{2_m}(Z(x_k), Z(x_l)) = \begin{cases} \frac{\phi_{1_m}(Z(x_k), Z(x_l)) - \phi_{1_m}(Z(x_k), Z(x_l))}{\phi_{1_m}^{max} - \phi_{1_m}^{min}}, & \phi_{1_m}(Z(x_k), Z(x_l)) - \phi_{1_m}(Z(x_k), Z(x_l)) \leq 0. \end{cases} \quad (17)$$

Результати розрахунку інтенсивності переваги системи в конфігурації x_k над системою в конфігурації x_l по критерію $Z_m(x)$ приведено в табл. 4.

Таблиця 4

Нормалізовані значення відносної оцінки переваг конфігурацій

k	l																			
	$\varphi_{2_1}(Z(x_k), Z(x_l))$					$\varphi_{2_2}(Z(x_k), Z(x_l))$					$\varphi_{2_3}(Z(x_k), Z(x_l))$					$\varphi_{2_4}(Z(x_k), Z(x_l))$				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	-	0,24	0	0	0	-	0	0,50	0,67	0,33	-	0,63	0	0	0	-	0,53	0	0	0
2	0	-	0	0	0	0,33	-	0,83	1	0,67	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0
3	0,57	0,80	-	0	0	0	0	-	0,17	0	0,63	0,94	-	0,31	0,25	0,42	0,95	-	0,21	0,05
4	0,78	1	0,22	-	0,67	0	0	0	-	0	0,42	0,83	0	-	0	0,21	0,74	0	-	0
5	0,12	0,36	0,45	0	-	0	0	0,17	0,33	-	0,75	1	0	0,50	-	0,47	1	0	0,26	-

Інтенсивності переваг, на відміну від їх оцінок, дають більш повне уявлення про домінування певної конфігурації системи за ефективністю в межах усіх критеріїв. По суті, цих даних достатньо, щоб провести ранжування конфігурацій за ефективністю по середніх показниках інтенсивності переваг. Проте, для розширення простору пошуку ефективних конфігурацій системи краще ввести ще один показник – інтенсивність програшу конфігурації x_k системи з конфігурацією x_l по критерію $Z_m(x)$, що обчислюється шляхом інверсії $\varphi_{2_m}(Z(x_k), Z(x_l))$:

$$L_m(x_k, x_l) = 1 - \varphi_{2_m}(Z(x_k), Z(x_l)). \quad (18)$$

Крім того, оцінка програшності системи в конфігурації x_k відносно інших конфігурацій дає змогу отримати два середніх показники: середню інтенсивність програшності конфігурації $\bar{E}_m(x_k)$ та середню інтенсивність виграності $\bar{H}_m(x_k)$ конфігурації системи на фоні інших конфігурацій. Результати розрахунків приведено в табл. 5.

Таблиця 5

Інтенсивність програшу конфігурацій системи за окремими критеріями

k	l																							
	$L_1(x_k, x_l)$					E	$L_2(x_k, x_l)$					E	$L_3(x_k, x_l)$					E	$L_4(x_k, x_l)$					E
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
1	-	0,76	1,00	1,00	1,00	0,94	-	1,00	0,50	0,33	0,67	0,63	-	0,38	1,00	1,00	1,00	0,84	-	0,47	1,00	1,00	1,00	0,87
2	1,00	-	1,00	1,00	1,00	1,00	0,67	-	0,17	0,00	0,33	0,29	1,00	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-	1,00	1,00	1,00	1,00
3	0,43	0,20	-	1,00	1,00	0,66	1,00	1,00	-	0,83	1,00	0,96	0,38	0,06	-	0,69	0,75	0,47	0,58	0,05	-	0,79	0,95	0,59
4	0,22	0,00	0,78	-	0,33	0,33	1,00	1,00	1,00	-	1,00	1,00	0,58	0,17	1,00	-	1,00	0,69	0,79	0,26	1,00	-	1,00	0,76
5	0,88	0,64	0,55	1,00	-	0,77	1,00	1,00	0,83	0,67	-	0,88	0,25	0,00	1,00	0,50	-	0,44	0,53	0,00	1,00	0,74	-	0,57
H	0,63	0,40	0,83	1,00	0,83	-	0,92	1,00	0,63	0,46	0,75	-	0,55	0,15	1,00	0,80	0,94	-	0,72	0,20	1,00	0,88	0,99	-

Отримані критеріальні оцінки $\bar{E}_m(x_k)$ та $\bar{H}_m(x_k)$ дають цілковите уявлення про «цінність» конкретної конфігурації для реалізації системи з урахуванням всіх критеріїв, не залежно від форми їх подання і масштабу абсолютних значень. Отримана оцінка якості конфігурації системи є векторизованою і містить декілька конкурентних станів, що можуть бути оцінені, як найкращі. Для усунення неоднозначності необхідно провести скаляризацію [9]. Це можна зробити шляхом обчислення середньої відстані від точки [1, 0] в просторі розподілу середніх інтенсивностей для кожної конфігурації

$$d_k = \sum_{j \in Z} \sqrt{(1 - \bar{H}_j(x_k))^2 + (\bar{E}_j(x_k))^2 \cdot \gamma_j}, \quad (19)$$

де γ_j - вектор критеріальних вагових коефіцієнтів. Якщо критерії мають однакову вагу, або не застосовуються, вважається $\gamma_j = \frac{1}{m}$.

Мінімальна середня відстань (19) буде відповідати найкращій, зваженій за всіма критеріями конфігурації системи. На рис. 2 (а) показано результати обчислення мінімальної відстані для різних конфігурацій СТС.

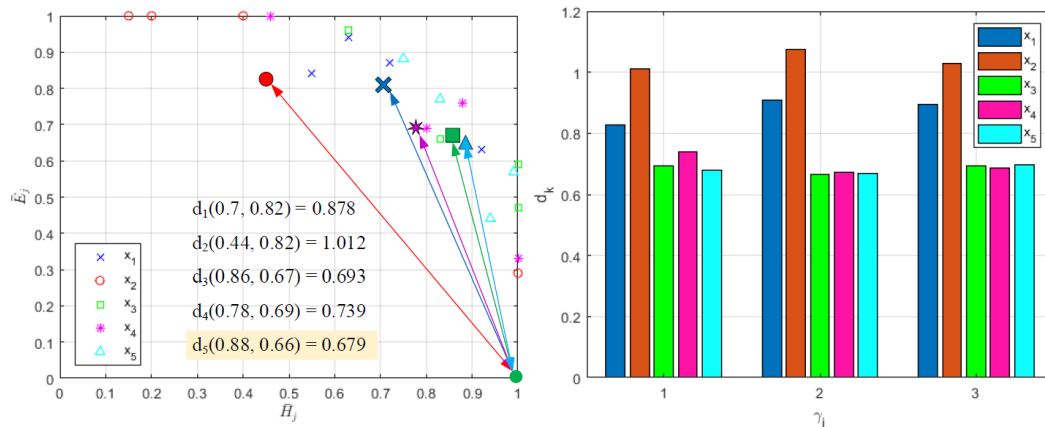


Рис. 2. Середня відстань: а) – в просторі розподілу середніх інтенсивностей; б) – гістограма для трьох наборів вагових коефіцієнтів

Застосування різних вагових коефіцієнтів для критеріїв в (19) при обчисленні середньої відстані (рис. 2, б) значно впливає на критеріальну значимість конфігурацій системи, тому, незначний перерозподіл вагових коефіцієнтів призводить до значних змін в пріоритетності конфігурацій системи (рис. 2, а), хоча на основну тенденцію це не впливає – групи аутсайдерів і лідерів зберігають свої відносні позиції. У всіх трьох випадках конфігурації перша і друга є найгіршими, при цьому третя, четверта і п'ята конфігурації конкурують між собою.

Висновки і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Запропонований підхід може стати стійкою основою побудови динамічних алгоритмів реконфігурації складних технічних систем при зміні зовнішніх умов або через внутрішньо-системні чинники. Цінність отриманого результату полягає в відсутності жорстких вимог до кількості та формалізму часткових критеріїв оптимальності – за рахунок процесу нормалізації векторного критерію на перших етапах формування простору станів.

Використання вектору вагових коефіцієнтів та основні принципи його формування залишились за межами даного дослідження. Це потужний інструмент управління проєкціями станів в просторі інтенсивностей переваг та програвів і потребує додаткового дослідження.

Подальше дослідження буде спрямоване на розробку методу вирішення оберненої задачі – формування та вибір множини станів складної технічної системи на основі обмежень в просторі інтенсивностей переваг та програвів. Це дасть змогу логічно завершити розробку моделі оптимальної конфігурації та адаптації СТС при зміні зовнішніх умов та при виникненні внутрішніх системних збурень.

Література

1. Research and Design Institute of design information, automation and communication on railway transport Moscow, V.Ya. Tsvetkov. COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS. Educational resources and technology. 2017. № 3. С. 86–92. 10.21777/2500-2112-2017-3-86-92.
2. Lyamkin A.A., G.V. Belskii. Complex technical systems models. 2015 XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) : 2015 XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). St. Petersburg, Russia : IEEE, 2015. С. 100–102. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7190423/>. (дата звернення : 14.02.2025).
3. Lee E.A. Cyber Physical Systems: Design Challenges. 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC) : 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing. Orlando, FL, USA : IEEE, 2008. Cyber Physical Systems. С. 363–369. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/4519604/>. (дата звернення : 31.10.2024).
4. Кіберфізичні системи як основа інтелектуалізації «розумних» підприємств. Control systems and computers. 2019. № 4 (282). С. 14–26. <https://doi.org/10.15407/usim.2019.04.014>.
5. Чесановський І., А. Бабарика, С. Табенський. Концептуальна модель кіберфізичної системи в системі інформаційно-технічного забезпечення охорони державного кордону. Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки. 2025. Вип. 97. № 4. С. 120–131. 10.32453/3.v97i4.1767.
6. Чесановський І., В. Собченко, В. Купельський. Синтез структури та обґрунтування вимог до багатофункціонального охоронного комплексу неперервного моніторингу кордону. Національні інтереси України. 2025. № 2(7). URL : <http://perspectives.pp.ua/index.php/niu/article/view/20042>. (дата звернення : 26.03.2025). 10.52058/3041-1793-2025-2(7)-512-524.
7. Theory of multiobjective optimization : Mathematics in science and engineering. Orlando : Academic Press, 2010. v. 176. 296 с.

8. Choice of architecture of video surveillance systems of State Border Guard of Ukraine based on cloud and fog technologies. Communication, informatization and cybersecurity systems and technologies. 2024. № 5. С. 5–14. 10.58254/viti.5.2024.01.05.
9. Кириченко І.О., Ю.В. Наливайко. Війна і математика: Елементи теорії складних бойових систем. Харків : Академнія ВВ МВС України, 2012. 260 с. URL : <https://hups.mil.gov.ua/periodical/monograph/2012/30>. (дата звернення : 25.02.2025).
10. Про схвалення Стратегії інтегрованого управління кордонами на період до 2025 року. Офіційний вебпортал парламенту України : веб-сайт. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/go/687-2019-%D1%80> (дата звернення: 02.10.2024).
11. Servatyuk V., D. Zakharchuk, S. Kastelan. Особливості організації оперативно-службової діяльності Державної прикордонної служби України. Journal of Scientific Papers «Social development and Security». 2023. Вип. 13. № 1. С. 23–28. 10.33445/sds.2023.13.1.3.
12. Полюк В., В. Нероба, А. Чуканов. Перспективи розвитку та застосування роботизованих систем озброєння в Україні. Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки. 2024. Вип. 93. № 4. С. 141–148. 10.32453/3.v93i4.1498.
13. Інтелектуальні системи автоматизації: монографія. Kharkiv, Ukraine : Press of the Kharkiv National University of Radioelectronics, 2022. URL : <http://publish.nure.ua/catalog/book/140>. (дата звернення : 25.02.2025).
14. Чесановський І., В. Собченко, Ю. Смолінський. Узагальнення методів структурної та функційної оптимізації складних технічних систем. Національні інтереси України. 2025. № 3(8). URL : <http://perspectives.pp.ua/index.php/niu/article/view/21296>. (дата звернення : 15.05.2025). 10.52058/3041-1793-2025-3(8)-513-523.

References

1. Tsvetkov V.Ya. Complex technical systems // Educational resources and technology. 2017. No. 3. P. 86–92. DOI: 10.21777/2500-2112-2017-3-86-92.
2. Lyamkin A.A., Belskii G.V. Complex technical systems models // 2015 XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg, Russia. IEEE, 2015. P. 100–102. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7190423/> (data zvernennia: 14.02.2025).
3. Lee E.A. Cyber Physical Systems: Design Challenges // 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), Orlando, FL, USA. IEEE, 2008. P. 363–369. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4519604/> (data zvernennia: 31.10.2024).
4. Kyberfizychni systemy yak osnova intelektualizatsii "rozumnykh" pidpriemstv // Control systems and computers. 2019. No. 4 (282). P. 14–26. DOI: 10.15407/usim.2019.04.014.
5. Chesanovskyi I., Babaryka A., Tabenskyi S. Kontseptualna model kyberfizychnoyi systemy v systemi informatsiino-tekhnichnoho zabezpechennia okhorony derzhavnoho kordonu // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Seriya: viiskovi ta tekhnichni nauky. 2025. Issue 97. No. 4. P. 120–131. DOI: 10.32453/3.v97i4.1767.
6. Chesanovskyi I., Sobchenko V., Kupelskyi V. Syntez struktury ta obhruntuvannia vymoht do bahatofunktsionalnoho okhoronnoho kompleksu neperervnoho monitorynhu kordonu // Natsionalni interesy Ukrainy. 2025. No. 2(7). URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/niu/article/view/20042> (data zvernennia: 26.03.2025). DOI: 10.52058/3041-1793-2025-2(7)-512-524.
7. Theory of multiobjective optimization: Mathematics in science and engineering. Vol. 176. Orlando: Academic Press, 2010. 296 p.
8. Choice of architecture of video surveillance systems of State Border Guard of Ukraine based on cloud and fog technologies // Communication, informatization and cybersecurity systems and technologies. 2024. No. 5. P. 5–14. DOI: 10.58254/viti.5.2024.01.05.
9. Kyrychenko I.O., Nalyvaiko Yu.V. Viina i matematika: Elementy teorii skladnykh boiovykh system. Kharkiv: Akademiia VV MVS Ukrainy, 2012. 260 p. URL: <https://hups.mil.gov.ua/periodical/monograph/2012/30> (data zvernennia: 25.02.2025).
10. Pro skhvalennia Stratehii intehravanoho upravlinnia kordonomy na period do 2025 roku // Ofitsiyni webportal parlamentu Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/687-2019-p> (data zvernennia: 02.10.2024).
11. Servatyuk V., Zakharchuk D., Kastelan S. Osoblyvosti orhanizatsii operativno-sluzhbovoi diialnosti Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy // Journal of Scientific Papers "Social development and Security". 2023. Issue 13. No. 1. P. 23–28. DOI: 10.33445/sds.2023.13.1.3.
12. Poliuk V., Neroba V., Chukanov A. Perspektyvy rozvytku ta zastosuvannia robotyzovanykh system ozbroiennia v Ukraini // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Seriya: viiskovi ta tekhnichni nauky. 2024. Issue 93. No. 4. P. 141–148. DOI: 10.32453/3.v93i4.1498.
13. Intelektualni systemy avtomatyzatsii: monohrafiia. Kharkiv, Ukraine: Press of the Kharkiv National University of Radioelectronics, 2022. URL: <http://publish.nure.ua/catalog/book/140> (data zvernennia: 25.02.2025).
14. Chesanovskyi I., Sobchenko V., Smolinskyi Yu. Uzahtalennia metodiv strukturoi ta funktsiinoi optymizatsii skladnykh tekhnichnykh system // Natsionalni interesy Ukrainy. 2025. No. 3(8). URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/niu/article/view/21296> (data zvernennia: 15.05.2025). DOI: 10.52058/3041-1793-2025-3(8)-513-523.