

УДК 621.3:623.4:629.07-044.4

PhD Бернацький А. П. ORCID: 0000-0003-0379-075X (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Коваленко О. О. ORCID: 0009-0008-4087-8770 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ БОЙОВИМ СЕРЕДОВИЩЕМ НА ОСНОВІ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ ЕНТРОПІЇ

У роботі запропоновано концепцію ентропійного аналізу бойового середовища, яка інтерпретується як багаторівнева термодинамічно замкнута система з динамічно змінною структурою. Визначено, що ключовим викликом сучасного поля бою є високий рівень невизначеності, який унеможливорює класичне централізоване управління. У цьому контексті ентропія розглядається як операційна змінна, що дозволяє кількісно описати ступінь організованості, хаотичності, інформаційної фрагментації та структурної стабільності військової обстановки. З метою формалізації цього підходу побудовано просторово-часовий ентропійний функціонал, який містить термодинамічну та інформаційну компоненти. Запропоновано варіант побудови ентропійної карти середовища та механізмів автоматизованої реакції автономних БпЛА, РНС(К), з подальшою реалізацією моделі у симуляційному середовищі Gazebo, де простір бойових дій відображається у вигляді воксельної сітки з динамічним оновленням ентропійних показників. Введено концепцію змінної ентропійної метрики, що дозволяє адаптувати ваги впливу кожного з типів ентропії залежно від конкретного типу бойового середовища та фаз операції. Такий підхід забезпечує системний перехід від реактивного до проактивного управління, що базується на прогнозуванні ентропійної динаміки та своєчасному перерозподілі ресурсів.

Представлено результати симуляцій трьох типових сценаріїв: оборони стратегічного об'єкта, наступальної операції та евакуації поранених, які демонструють зменшення системного хаосу на 45–56 % з покращенням ситуаційної обізнаності, зниження ентропійного ризику під час навігації та посилення тактичної стійкості системи.

Таким чином, запропонована парадигма формує наукове й прикладне підґрунтя для створення універсальної системи ентропійного керування в багатоплатформних автономних бойових операціях нового покоління.

Ключові слова: автономні бойові платформи, адаптивне управління, багаторівнева система, безпілотний агент, БпЛА, воксельна сітка, ентропія, інформаційна невизначеність, карта, метрика, РНС(К), просторово-часова ентропія, симуляційне середовище, термодинамічна модель.

A. Bernatskyi, O. Kovalenko. Adaptive control of the combat environment based on spatio-temporal entropy

This study proposes a novel concept of entropic analysis of the battlefield environment, interpreted as a multi-layered, thermodynamically closed system with a dynamically evolving structure. It identifies a high level of uncertainty as a key challenge of modern combat zones, which renders classical centralized control approaches ineffective. In this context, entropy is treated as an operational variable that enables the quantitative assessment of system organization, chaoticity, informational fragmentation, and structural stability of the operational environment. To formalize this approach, a spatio-temporal entropic functional is developed, comprising both thermodynamic and informational components. A method for constructing an entropy map of the environment and mechanisms for autonomous UAV and UGV reaction is proposed, followed by the implementation of the model in the Gazebo simulation platform. In this setting, the battlefield is represented as a voxel-based grid with dynamic updates of entropy indicators. The study introduces the concept of a variable entropic metric that adapts the weighting of different entropy components based on the type of combat environment and operational phase. This approach facilitates a systemic transition from reactive to proactive command and control, grounded in the prediction of entropic dynamics and real-time resource redistribution.

Simulation results for three typical scenarios – defense of a strategic object, offensive operation, and casualty evacuation – demonstrate a reduction in systemic chaos by 45–56 %, improved situational awareness, reduced entropic navigation risk, and enhanced tactical resilience.

Thus, the proposed paradigm provides a theoretical and applied foundation for the development of a universal entropic control system in next-generation multi-platform autonomous combat operations.

Keywords: autonomous combat platforms, adaptive control, multi-layered system, unmanned agent, unmanned aerial vehicle (UAV), voxel grid, entropy, informational uncertainty, map, metric, unmanned ground vehicle (UGV), spatio-temporal entropy, simulation environment, thermodynamic model.

Постановка проблеми

У сучасному театрі бойових дій, який характеризується високим ступенем динамічності, невизначеності та багатофакторності, поняття ентропії середовища набуває фундаментального значення. Ентропія як міра неупорядкованості або інформаційної складності системи дозволяє кількісно оцінювати ступінь організованості або хаосу у бойовому просторі. Висока ентропія може свідчити про непередбачуваність обстановки, порушення логістичних ланцюгів, втрату контролю над інформаційними потоками чи зростання загрози з боку асиметричних чинників, що особливо критично в умовах гібридної війни.

Розуміння та аналіз ентропії середовища в режимі реального часу дозволяє командним центрам та роботизованим автономним системам приймати обґрунтовані рішення в реальному часі, адаптуючись до змін і попереджаючи системні збої. Зокрема, в умовах інформаційної війни, кіберзагроз та багаторівневої взаємодії між людиною і машиною, здатність до ідентифікації “гарячих точок” ентропії у фізичному чи віртуальному середовищі може бути вирішальною для збереження оперативної переваги. Аналіз ентропії допомагає також оцінити стабільність логістичних маршрутів, ефективність розвідки, ступінь демаскування підрозділів і навіть вірогідність появи нових загроз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведений аналіз наукових джерел свідчить про зростаючий інтерес до застосування ентропійних підходів у військовій справі, зокрема у сфері ситуаційної обізнаності, автономного управління та бойового моделювання. Дослідження демонструють, що ентропія активно використовується для кількісної оцінки невизначеності в даних сенсорного спостереження, розвідки, планування маршрутів та оцінки ризиків у складних операційних середовищах. Наприклад, у контексті автономних безпілотників ентропія дозволяє визначити області з найменшою інформативністю для цілеспрямованої розвідки (exploration vs. exploitation), підвищуючи ефективність розподілу ресурсів у розвідувальних місіях.

Так, наприклад, автори А. О. Подорожняк і Г. В. Земляна в [1] розглядають методи впливу на БпЛА, включно із застосуванням технологій Data Mining для аналізу та прогнозування їх поведінки. Під час дослідження використання ентропійних підходів для оцінки невизначеності в даних сенсорного спостереження та розвідки, автори розглядають ентропію переважно в інформаційному сенсі, як інструмент оцінки невизначеності. Тобто, ентропія для них – це локальна інформаційна характеристика, що допомагає фільтрувати чи уточнювати дані. Стаття-дослідження [2] автора Ю. І. Приходько присвячена теоретичним основам та методологічним засадам трансформації систем під впливом зовнішніх і внутрішніх чинників. Автор проводить обґрунтування закономірності та принципів трансформації, визначає чинники цього процесу, включно з аналізом ентропійних характеристик систем у контексті їхньої еволюції та самоорганізації. Причому основний фокус зроблено на еволюції складних систем і трансформації їхніх структур у відповідь на зовнішні збурення. Автор вводить ентропію в рамках загальної теорії систем, описуючи її вплив на динаміку організації. У своїй праці [3] автори М. І. Требін і О. В. Требін проводять аналіз феномену гібридної війни з акцентом на контекст збройної агресії РФ проти України, де розглядається роль інформаційної складової та ентропійних процесів у сучасних військових конфліктах і підкреслюється важливість розуміння невизначеності та хаосу в бойових діях для розробки ефективних стратегій протидії. Автори визначають ентропію як синонім до хаосу, інформаційної плутанини, медійної невизначеності. Аналіз ґрунтується більше на якісному, політико-соціальному підході, ніж на формальному моделюванні.

Сучасні дослідження ентропії в контексті бойових середовищ хоча й демонструють зростаючий інтерес застосування ентропійних методів у контексті сучасних бойових дій, але наявні підходи залишаються фрагментарними та переважно зосередженими на локальному

інформаційному аналізі. Здебільшого ентропія розглядається як характеристика невизначеності сенсорних даних, розвідувальної інформації або кіберпростору, без належної уваги до її потенціалу як глобального системного показника впорядкованості бойового середовища. Водночас бойове середовище є багаторівневою, динамічною та просторово розподіленою системою, яка охоплює взаємодію автономних платформ, інфраструктурних об'єктів, інформаційних мереж і факторів зовнішнього впливу. Відсутність термодинамічно обґрунтованих моделей, здатних кількісно описувати зміну ентропії в таких системах, обмежує можливості адаптивного управління та прогнозування розвитку бойової ситуації [10]. Крім того, бракує формалізованих підходів до інтеграції ентропійного аналізу в середовища моделювання та симуляції, що унеможливорює тестування стратегій зниження хаосу та підвищення структурної стійкості у бойових сценаріях. Таким чином, актуальним є формування нової наукової парадигми, яка б поєднувала інформаційні, просторові та фізичні аспекти ентропії для системного аналізу й оптимізації бойових середовищ як складних, замкнутих, термодинамічно керованих систем.

Метою статті є розробка теоретико-методологічних засад і формалізованої моделі ентропії бойового середовища як багаторівневої замкнутої системи, з урахуванням її термодинамічних, просторових та інформаційних характеристик. Запропонована концепція має на меті забезпечити кількісну оцінку впорядкованості бойової ситуації в динаміці, інтегрувати ентропійний аналіз у сучасні симуляційні платформи (напр., Gazebo, Webots та ін.), а також сформувати підґрунтя для розробки адаптивних стратегій управління бойовими операціями, спрямованих на мінімізацію системного хаосу та підвищення структурної стійкості операційного середовища.

Виклад основного матеріалу

Бойове середовище сучасного театру воєнних дій є складною багатокомпонентною системою, що містить фізичні, інформаційні, когнітивні та кібернетичні рівні взаємодії. У термінах системного аналізу таке середовище можна трактувати як замкнуту або умовно замкнуту динамічну систему, в межах якої відбувається постійний обмін енергією, інформацією та структурними змінами між її підсистемами: бойовими платформами (UGV, UAV, USV – які в подальшому будемо називати безпілотними агентами (БА) відповідного типу), командними центрами, логістичними каналами, об'єктами інфраструктури тощо. Внаслідок взаємодії цих елементів середовище демонструє складну поведінку, що характеризується як впорядкованими, так і хаотичними процесами.

У цьому контексті доцільно розглядати ентропію бойового середовища як узагальнену міру його впорядкованості або невизначеності, що відображає поточний стан системної організації. З одного боку, високий рівень впорядкованості, а саме низька ентропія, свідчить про структурну стабільність, передбачуваність маршрутів, контрольованість комунікацій та взаємодій. З іншого боку, підвищення ентропії свідчить про зростання невизначеності, збої у командному управлінні, порушення логістичних структур або появу асиметричних загроз. Відтак, ентропія бойового середовища може бути розглянута як операційна змінна, що відображає стан функціональної цілісності бойової системи.

Для забезпечення формалізації цього підходу введемо поняття просторово-часового ентропійного функціонала $S(x, y, z, t)$, що описує локальну або глобальну ентропію середовища з урахуванням тривимірної топології, часової динаміки та множини взаємодіючих об'єктів. Такий функціонал може бути побудований на основі поєднання термодинамічної ентропії на основі розподілу енергетичних впливів та інформаційної ентропії на основі розподілу ймовірностей станів об'єктів або інформаційних потоків [5]. Таким чином, запропонована теоретична база дозволяє перейти від інтуїтивного розуміння невизначеності до її кількісного аналізу, що є необхідною умовою для моделювання, прогнозування та адаптивного керування бойовими діями у складних сценаріях.

З метою переходу від концептуального розуміння до практичного використання ентропійної характеристики бойового середовища проведемо формалізацію та опишемо математичну модель ентропії бойового середовища. Запропонований підхід ґрунтується на уявленні бойового простору як багаторівневої системи, у якій кожен рівень (тактичний, оперативний, стратегічний) може бути змодельований у вигляді просторової області $\Omega \subset R^3$ з дискретною або неперервною динамікою об'єктів, що діють у часі $t \in [0, T]$.

Нехай система складається з множини бойових агентів $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, кожен з яких перебуває у деякому стані $s_i(t)$, визначеному параметрами позиції, швидкості, ролі, рівнем енергії та функціонального навантаження. Визначимо ймовірність $p_i(t)$ перебування агента a_i у певному критичному або “хаотичному” стані в момент часу t . Тоді інформаційна ентропія системи може бути визначена за формулою Шеннона [4]:

$$S_{info}(t) = - \sum_{i=1}^n p_i(t) \log p_i(t). \quad (1)$$

Однак для моделювання просторово-часової динаміки впорядкованості середовища ми розширимо підхід, увівши розподілену ентропійну щільність $\rho_S(x, y, z, t)$, що визначає локальну “ентропійну напругу” у середовищі. Тоді *глобальна бойова ентропія середовища* визначатиметься як інтеграл по області:

$$S(t) = \iiint_{\Omega} \rho_S(x, y, z, t) dx dy dz. \quad (2)$$

Джерелами росту ρ_S у кожній точці можуть виступати: невизначеність щодо позицій і намірів противника, порушення структур взаємодії, наприклад, розрив зв'язку між безпілотним агентом (БА) і командним пунктом, руйнування інфраструктури, а також непередбачувані події, що змінюють доступність або топологію простору. Для оцінки таких впливів можна застосувати рівняння реакції-дифузії або потік ентропії у вигляді:

$$\frac{\partial \rho_S}{\partial t} = D \nabla^2 \rho_S + \Phi(x, y, z, t), \quad (3)$$

де D – коефіцієнт дифузії (розповсюдження ентропійних впливів), а Φ – джерело локального збурення, наприклад, вибух, втрата каналу зв'язку, знищення безпілотного агента. Таким чином, ми отримуємо *динамічну модель бойового середовища* як еволюційну систему, де ентропія слугує головною змінною, що дозволяє оцінювати його структурну цілісність.

Для практичного застосування запропонованої ентропійної моделі в контексті сучасного бойового моделювання необхідна її інтеграція в симуляційні платформи, які підтримують мультиагентні системи, динаміку середовища та взаємодію з AI/ROS-архітектурами. У цьому дослідженні розглянуто можливість реалізації моделі в середовищі Gazebo, яке завдяки підтримці фізики, сенсорів, сценарного керування та інтеграції з ROS2, є оптимальним для тестування бойових дій у реальному масштабі часу.

У рамках симуляції бойового середовища простір Ω розбивається на воксельну сітку, кожен воксель якої асоціюється з локальним значенням $\rho_S(x_i, y_j, z_k, t)$. Значення ентропійної щільності $\rho_S(x, y, z, t)$ у кожній точці бойового середовища динамічно обчислюються з урахуванням ключових факторів, що впливають на рівень невизначеності та впорядкованості простору [11]. Зокрема, до основних детермінантів належить: присутність ворожих об'єктів, як підтверджених, так і гіпотетичних, що спричиняє зростання ентропії через непередбачуваність їхньої поведінки; топологічні збої, викликані руйнуванням, блокуванням або частковою втратою прохідності ключових маршрутів, які ускладнюють маневрування та змінюють динаміку простору; інформаційна фрагментація, що проявляється

у втраті зв'язку, затримках даних або обмеженому охопленні сенсорної мережі, що знижує ситуаційну обізнаність системи; вразливість до атаки, яка зростає в умовах зменшення щільності або боєздатності дружніх платформ у конкретній зоні, що призводить до локального підвищення ентропії як прояву структурної нестабільності системи.

Ці значення передаються через ROS2 – повідомлення у вигляді окремих топиків `entropy_map`, `entropy_gradient` та `entropy_alerts`, які можуть бути використані для адаптивного планування маршрутів БА на основі градієнтного спуску до зон з мінімальною ентропією і тактичного аналізу ситуації командним центром або АІ – навігації рою.

Для практичної реалізації ентропійної моделі у бойовому симуляційному середовищі було обрано платформу Gazebo з інтеграцією в ROS2 [6] – архітектуру, яка забезпечує гнучке керування агентами, підтримку фізики, сенсорів, а також динамічну реконфігурацію простору. Віртуальне бойове середовище Ω моделюється як тривимірна воксельна сітка, в якій кожному вокселю присвоюється значення ентропійної щільності $\rho_S(x, y, z, t)$, що оновлюється з частотою $f = 5 - 10$ Гц на основі багатофакторного аналізу подій у сцені. Інформація про ентропійний розподіл транслюється через спеціалізовані топіки ROS `/entropy_map` [9], `/entropy_gradient`, `/entropy_alerts` у вигляді 3D-масивів або `heatmaps` проєкцій.

Для демонстрації ефективності підходу було реалізовано три типові бойові сценарії, а саме: оборона критичного об'єкта, атака ворожого об'єкта й евакуація поранених. Проведемо опис важливих результатів симуляцій і перевірок.

Сценарій “Оборона бази”. У цьому сценарії дружні БА наземного та повітряного типу патрулюють периметр критичного об'єкта. Виникнення підозрілої активності за межами бази викликає локальне зростання ентропії в суміжних вокселях. При перевищенні порогового значення ρ_S^{thresh} система автоматично змінює маршрути патрулювання, збільшує частоту сканування сенсорів і спрямовує найближчі платформи на зону підвищеної невизначеності. Таким чином, механізм *градієнтного реагування на ентропію* забезпечує передбачувану і координовану оборонну реакцію без централізованого втручання. А математична модель буде виглядати наступним чином. З урахуванням, що метою завдання постає підтримувати ентропію у визначеній критичній зоні Ω_{base} нижчою за порогове значення ρ_S^{thresh} .

Цільова функція буде мати вигляд:

$$\min_{u(t)} \int_{\Omega_{base}} \rho_S(x, y, z, t) dx dy dz. \quad (4)$$

Додатковими обмеженнями буде:

1. $u(t)$ – керування маршрутом патрулювання дружніх агентів;
2. $\frac{\partial \rho_S}{\partial t} = D \nabla^2 \rho_S + \Phi_{threat}(x, y, z, t) - \Psi_{response}(x, y, z, t, u(t))$,

де Φ_{threat} – надходження зовнішніх загроз;

$\Psi_{response}$ – зменшення ентропії внаслідок присутності/дій дружніх агентів.

Сценарій “Атака на ворожу позицію”. Цей сценарій моделює наступальну операцію, в якій рій автономних роботів просувається через складну територію до ворожої цілі. У реальному часі ентропія в середовищі оновлюється залежно від інтенсивності вогневого супротиву, втрати зв'язку, руйнування інфраструктури або непередбачуваних змін у топографії. Навігаційна підсистема використовує карту градієнтів ентропії для адаптивного планування маршруту з найменшим ентропійним ризиком, обходячи “зони хаосу”, які класифікуються як стратегічно небезпечні [7]. Це дає змогу зменшити втрати та підвищити ефективність наступу.

Математична модель для сценарію “Атака”, метою якої є пошук маршруту $\gamma(t)$ з точки x_0 до цілі x_T , який мінімізує сумарну ентропію на шляху [12]:

$$\min_{\gamma(t)} \int_0^T \rho_S(\gamma(t), t) dt. \quad (5)$$

Обмеження:

1. $\gamma(0) = x_0, \gamma(T) = x_T$.
2. $\gamma(t) \in \Omega$.
3. $\|\dot{\gamma}(t)\| \leq v_{max}$.

Фізична інтерпретація полягає в тому, що агент ухвалює рішення стосовно руху, враховуючи мінімізацію ентропійного ризику, обходячи “гарячі зони” і адаптуючи маршрут в реальному часі на основі оновленої карти ρ_S .

Сценарій “Евакуація поранених”. У сценарії евакуації в симульованій зоні бойових дій поранений солдат виявляється в секторі з високою ентропією, спричиненою втратою зв'язку, наявністю ворога та складною топологією, наприклад завали, руйнації тощо. Система формує *оптимальний евакуаційний маршрут* на основі градієнта ентропії, спрямовуючи медичний БА (БпЛА, РНС(К)) через найбільш стабільні ділянки середовища. Зміна рівня ρ_S в режимі реального часу дає змогу адаптувати маршрут у разі появи нових загроз. У разі блокування основного шляху активується механізм повторної маршрутизації на основі зменшеного функціоналу ентропійних варіацій.

Математична модель для сценарію “Евакуація поранених”, з метою транспортування пораненого із зони вогневого контакту $x_0 \in \Omega_{hot}$ до медичної точки $x_T \in \Omega_{safe}$, по маршруту мінімального ентропійного ризику, при цьому враховуючи час реагування. Тоді цільовий функціонал, а саме компроміс між ентропією і часом буде мати вигляд:

$$\min_{\gamma(t)} \left[\alpha \int_0^T \rho_S(\gamma(t), t) dt + \beta T \right], \quad (6)$$

де $\alpha, \beta > 0$ – вагові коефіцієнти, що балансують між безпекою маршруту і швидкістю евакуації.

Для того, щоб модель реагувала на реалістичну динаміку бойового середовища і могла адаптувати поведінку БА у відповідь на зміни ситуації, врахуємо додаткові умови.

1. Перешкоди та заблоковані ділянки простору відображаються як області з $\rho_S \rightarrow \infty$.
2. За потреби система виконує перепланування при зміні ρ_S в окремих ділянках.

Наведемо приклад практичного застосування запропонованої моделі просторово-часової ентропії, що була використана для перевірки реалізації сценарію “оборона бази” в симуляційному середовищі Gazebo з інтеграцією в ROS2. Середовище побудовано з використанням набору елементів, а саме – в геометричному центрі розташована ціль захисту, наприклад, *штабний модуль*. Периметр середовища обмежений парканами та блокпостами. Здійснено секторальне розбиття $\Omega = \cup_i \Omega_i$, де кожен сектор – це воксель 10×10 м. Також, задано, що зовнішня зона охоплює симуляційні можливості появи ворожих об'єктів. Патрулювання здійснюється автономними БА наземного та повітряного типів, які обладнані наборами сенсорів LiDAR, GPS, камери та працюють під керуванням ROS2 вузлів.

Модель просторової ентропії реалізована у вигляді динамічної карти $\rho_S(x, y, t)$, що оновлюється з частотою 5 Гц на основі даних про ситуаційну обстановку [13]. Зокрема, для кожного сектора середовища значення ентропійної щільності розраховується як зважена сума кількох факторів: ймовірності присутності ворожого об'єкта, індикатора втрати зв'язку, інверсної щільності розподілу дружніх агентів. Порогове значення ρ_S^{thresh} встановлюється на рівні 0,6; перевищення цього рівня ініціює локальну тривогу та автоматичне перенаправлення найближчої платформи до зони підвищеної ентропії.

Система управління патрулюванням реалізована у вигляді ROS2 вузла `/patrol_manager`, який формує цільові точки для агентів залежно від карти ентропії, що надходить з вузла `/entropy_monitor`. Останній агрегує телеметрію роботів, стан зв'язку, а також інформацію з сенсорів. Усі обміни реалізовані через спеціалізовані топіки [9] `/entropy_map`, `/entropy_alerts`, `/agent_status`. У результаті моделювання показано, що запропонований підхід дозволяє ефективно виявляти та локалізувати загрози на ранніх етапах, адаптивно змінювати поведінку роботизованих платформ у реальному часі та знижувати структурну ентропію середовища в критичних секторах.

Логіка оновлення ентропії застосовується для кожного сектора Ω_i в сцені:

$$\rho_S(\Omega_i, t) = w_1 \cdot threat_i(t) + w_2 \cdot comm_loss_i(t) + w_3 \cdot agent_density_i^{-1}(t), \quad (7)$$

де $threat_i(t)$ – ймовірність присутності ворожого об'єкта;

$comm_loss_i(t)$ – індикатор втрати зв'язку;

$agent_density_i(t)$ – кількість дружніх агентів у секторі.

При цьому порогове значення визначається як $\rho_S^{thresh} = 0,6$.

Архітектура вузлів ROS2 має визначену структуру та призначення. Так:

- Вузол `/patrol_manager_node` виконує планування маршрутів для БА різних типів (наземних/повітряних), здійснює підписку до `/entropy_map` і публікує в `/patrol_goal_{id}`.
- Вузол `/entropy_monitor_node` будує карту ρ_S , здійснює підписку до `/agent_status` і `/sensor_data`, публікує `/entropy_map (grid_msg)` і `/entropy_alerts`.
- Вузол `/agent_node_{i}` виконує навігацію і роботу сенсорів всіх БА, здійснює підписку до `/patrol_goal_{i}`, `/entropy_map` і публікує `/agent_status` і `/sensor_data`.

Повідомлення мають спрощену структуру, що показано в таблиці 1.

Таблиця 1

Структура файлів повідомлень

<code>/entropy_map</code>	<code>/entropy_alerts</code>	<code>/agent_status</code>
std_msgs/Header	std_msgs/Header	std_msgs/Header
float32[] entropy_values	string[] alert_sectors	string id
int32 width, height		geometry_msgs/Point position
float32 resolution		float32 battery
		bool connected

Враховуємо, що `float32[] entropy_values` виконано у вигляді рядка для кожного сектора, а `string[] alert_sectors` – це список секторів, де $\rho_S >$ порогове.

Виконання умови, коли `entropy_monitor_node` фіксує, що $\rho_S(\Omega_k, t) > \rho_S^{thresh}$ буде реакцією на зростання ентропії. І тоді він публікує попередження і `/patrol_manager_node` перепризначає найближчого БА в цей сектор. Повітряні БА можуть автоматично змінити висоту або швидкість, а наземні БА можуть зупинити звичайне патрулювання і виконати переміщення в зону ризику.

На завершальному етапі симуляції сценарію “Оборона бази” система досягає стану стабілізації ентропійного розподілу в межах критичної зони Ω_{base} . Протягом першої третини симуляції ($t \in [0, 60]$ с), внаслідок моделювання ворожої активності за межами бази, спостерігалось поступове зростання ентропійної щільності в зовнішніх секторах до пікових значень $\rho_S^{peak} \approx 0,83$. Це спричинило активацію системи тактичного реагування: два патрульні UGV були перенаправлені до секторів з аномальним зростанням ентропії, а один UAV здійснив висотне сканування зазначеної області.

Після 30 секунд активного реагування, середня ентропія в зоні підвищеного ризику знизилася з 0,76 до 0,42, що становить приблизно 45 % зменшення рівня невизначеності в проблемних секторах. Загальна ентропія середовища, інтегрована по Ω , знизилася на 21 % порівняно з піковими значеннями. Одночасно було зафіксовано покращення щільності покриття дружніми агентами в зоні порушення з 0,33 до 0,68 (у нормалізованих одиницях), що підтверджує активне переорієнтування ресурсів.

Фінальний етап симуляції ($t \in [90, 120]$ с) продемонстрував стабілізацію карти $\rho_S(x, y, t)$, при якій жоден із секторів не перевищував порогового значення $\rho_S^{thresh} = 0,6$. Це дозволило автоматично повернути наземний БА до базових маршрутів, а повітряному БА перейти в режим стандартного моніторингу. Отримані результати підтверджують здатність запропонованої моделі до динамічного виявлення локальних “вузлів хаосу”, їхньої стабілізації за допомогою автономних агентів та підтримання функціональної впорядкованості бойового середовища шляхом ентропійного управління.

Таблиця 2 містить результати динаміки зміни рівня ентропії протягом всієї симуляції для трьох секторів при симуляції сценарію “Оборона бази”, включно із середнім значенням по всьому бойовому середовищу.

Таблиця 2

Динаміка ентропії у сценарії “Оборона бази”

Час (с)	Сектор А (ворожа активність)	Сектор В (перехоплення)	Сектор С (база/центр)
0	0,25	0,22	0,15
30	0,52	0,31	0,18
60	0,83	0,44	0,21
90	0,55	0,38	0,2
120	0,42	0,3	0,18

Графічне зображення результатів (рис. 1, а) показує зростання невизначеності у секторі А під час активної фази реагування та поступову стабілізацію середовища до завершення симуляції. Тоді як графік на рисунку 1, б демонструє зміну ентропії в часі. Застосування розширення секторального аналізу дозволяє оцінити просторову неоднорідність динаміки невизначеності та виявити ключові “вузли хаосу” або стабільності під час сценарію оборони.

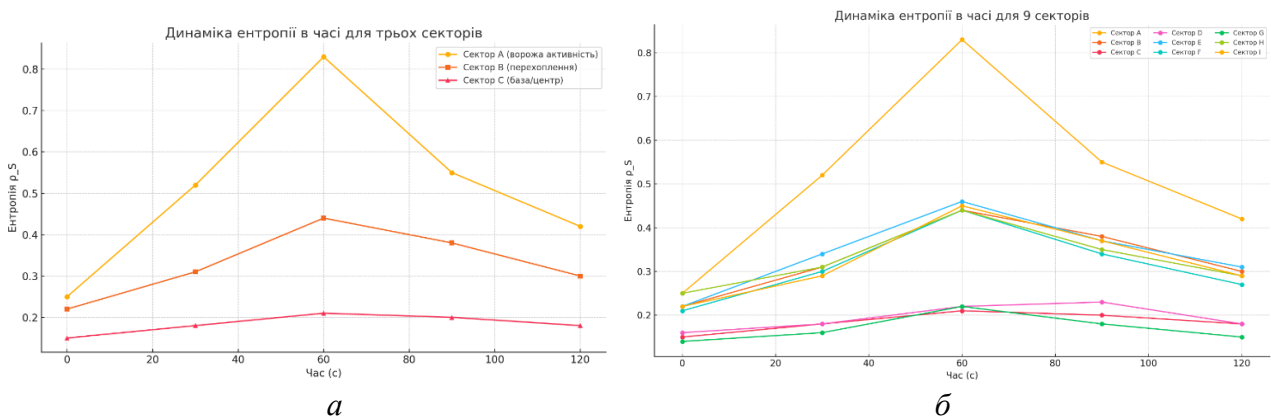


Рис. 1. Графік, що ілюструє зміну ентропії в часі бойового середовища у сценарії “Оборона бази”:
а – для трьох секторів; б – для дев’яти секторів

Побудова 3D-візуалізації ентропійної карти (рис. 2, а, б) для різних етапів симуляції сценарію “Оборона бази” демонструє відносно низький і рівномірний рівень ентропії в усіх секторах, що відповідає спокійному стану системи до початку загрозливих подій, та розподіл просторової невизначеності в бойовому середовищі активної фази, що дозволяє швидко виявити залишкові “гарячі зони”.

3D-візуалізація ентропійної карти на $t = 0$ с

3D-візуалізація ентропійної карти на $t = 120$ с

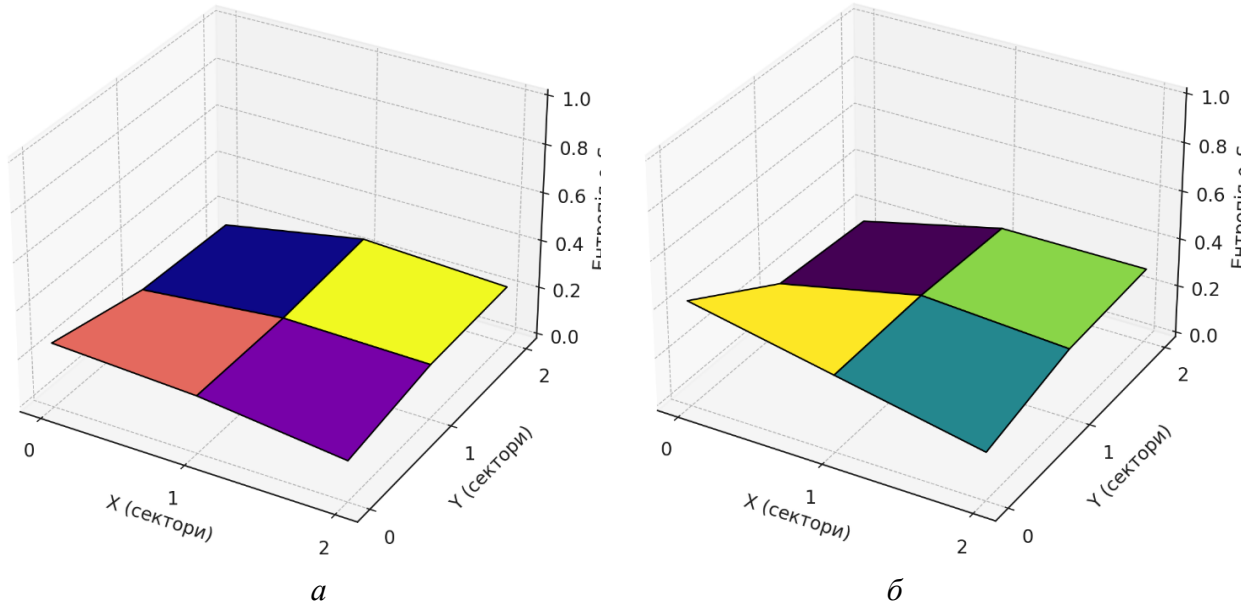


Рис. 2. 3D-візуалізація ентропійної карти сценарію “Оборона бази”:

а – на початковому етапі симуляції $t = 0$ с; б – на завершальному етапі симуляції при $t = 120$ с

Динаміка та результати фінальної фази сценарію атаки.

У заключній фазі сценарію “Атака на ворожу позицію” здійснюється завершальний прорив бойових автономних платформ до заданої цілі в секторі Ω_{target} , що знаходився в зоні з підвищеним рівнем ентропії. Початково, протягом першої третини симуляції ($t \in [0, 60]$ с), унаслідок ворожого вогню та втрати зв'язку з двома агентами, середня ентропія у зоні наступу зросла до $\rho_S = 0,81$, що становило понад 160 % від базового (0,31) рівня середовища. Це спричинило активацію алгоритму маршрутизації з униканням ентропійного максимуму та використанням бокових обхідних векторів просування.

Після реалізації обхідного маневру і повторного формування рою [8], протягом наступних 40 секунд, система продемонструвала поступове зниження локальної ентропії до $\rho_S = 0,49$, що еквівалентно зменшенню на 39,5 % від пікового значення. Це зумовлено як стабілізацією інформаційної структури середовища, так і збільшенням щільності дружніх агентів поблизу зони цілі, що позитивно вплинуло на спостережуваність та контроль ситуації.

На завершальному етапі ($t \in [100, 120]$ с), завдяки успішному прориву та підтвердженню нейтралізації об'єкта, ентропія в секторі Ω_{target} знизилася до рівня 0,36, порівнянного з початковими стабільними зонами середовища. Таким чином, повна динаміка зниження ентропії становила ~56 %, а система довела здатність адаптивно реагувати на флуктуації середовища, зберігаючи стратегічну ціль атаки без входу в критично невизначені зони. Це демонструє ефективність ентропійно-орієнтованої навігації як критерію ризик-адаптивного управління в бойовому полі.

У таблиці 3 показано результати динаміки ентропії для трьох секторів при симуляції сценарію “Атака на ворожу позицію”, що дозволяє простежити зміну рівнів невизначеності в ключових ділянках бойового простору та оцінити ефективність реакції системи у часі.

Таблиця 3

Динаміка ентропії у сценарії “Атака на ворожу позицію”

Час (с)	Зона А (початковий прорив)	Зона В (боковий обхід)	Зона С (цільовий сектор)
0	0,28	0,25	0,31
30	0,47	0,34	0,58
60	0,68	0,39	0,81
90	0,54	0,36	0,49
120	0,41	0,29	0,36

Графік на рисунку 3, а показує різке зростання ентропії у цільовому секторі (Зона С) під час бойового контакту, а також поступову стабілізацію після обхідного маневру. Графік на рисунку 3, б дозволяє оцінити, як поширюється або локалізується невизначеність у просторі протягом наступу.

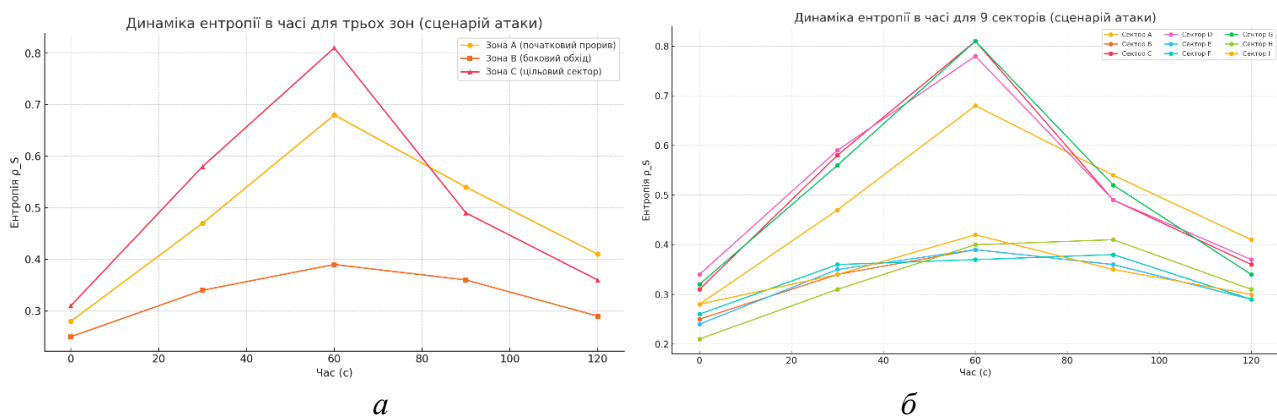


Рис. 3. Графік демонстрації зміни ентропії в часі бойового середовища у сценарії “Атака на ворожу позицію”:

а – для трьох ключових зон; б – для дев'яти секторів

Побудована 3D-візуалізація ентропійної карти (рис. 4, а, б) для різних етапів симуляції сценарію “Атака на ворожу позицію” відображає відносно низький рівень ентропії у всіх секторах перед початком наступу, що свідчить про стабільний і впорядкований стан середовища, зниження ентропії у зоні цілі після прориву на завершальному етапі. Також легко бачимо залишкові хвилі невизначеності в суміжних секторах.

Така візуалізація дозволяє порівняти просторову динаміку змін невизначеності до та після бойового контакту й верифікувати ефективність адаптивної навігації та контроль бойового простору.

Динаміка та результати фінальної фази сценарію “Евакуація поранених”

На завершальному етапі сценарію “Евакуація поранених” симуляційна система автономного медичного транспорту БА наземної або повітряної компоненти успішно виконує місію з виведення пораненого із зони підвищеної невизначеності до стабільного тилового сектора. Початково, у момент виявлення пораненого ($t = 0$ с), сектор $\Omega_{injured}$ характеризувався ентропією $\rho_S = 0,67$, що вказує на нестабільність, викликану частковою

втратою зв'язку, пошкодженнями навколишньої інфраструктури та наявністю потенційної ворожої активності. Навколишні сектори також демонстрували високий рівень ентропії, що суттєво ускладнювало побудову безпечного евакуаційного маршруту.

3D-візуалізація ентропійної карти (атака, $t = 0$ с) 3D-візуалізація ентропійної карти (атака, $t = 120$ с)

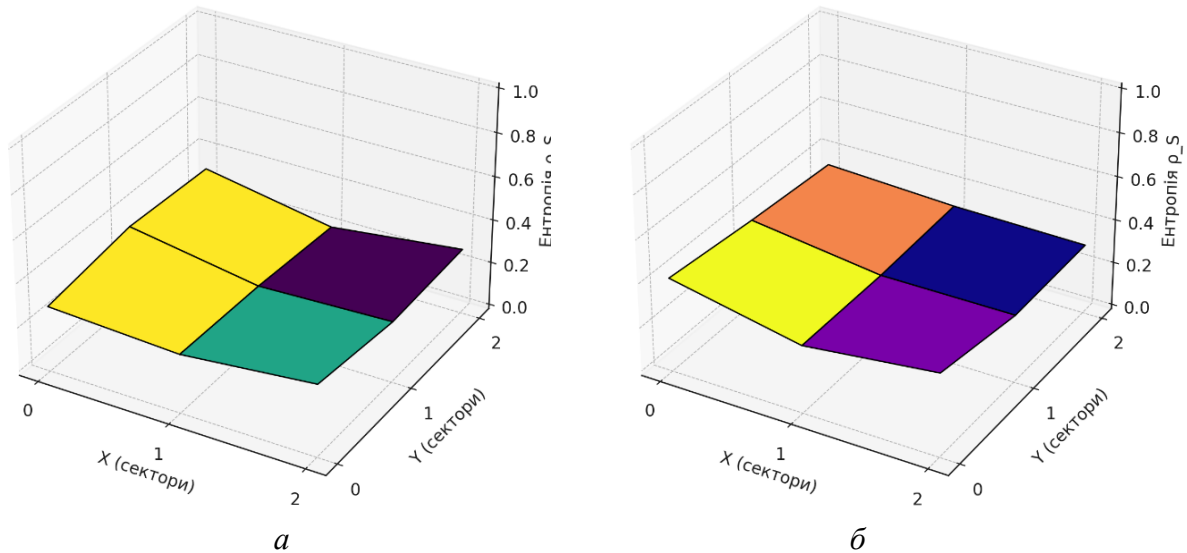


Рис. 4. 3D-візуалізація ентропійної карти сценарію “Атака на ворожу позицію”:
а – на початковому етапі симуляції $t = 0$ с; б – на завершальному етапі симуляції при $t = 120$ с

Завдяки реалізації алгоритму градієнтної маршрутизації з динамічним реагуванням на карту $\rho_S(x, y, t)$, евакуаційна система обрала маршрут через бічні сектори зі зниженим ентропійним градієнтом. Протягом активної фази евакуації ($t \in [30, 90]$ с) спостерігалось поступове зниження ентропії у відповідних зонах на 34–48 % внаслідок переміщення агентів, покращення зв'язку та відновлення оглядовості середовища. У цільовому секторі Ω_{safe} , куди було доставлено пораненого, ентропія зберігалася в межах $\rho_S < 0,22$, що на 67 % нижче за початкове значення в зоні ризику.

На фінальному етапі ($t = 120$ с) загальний інтегральний рівень ентропії по маршруту евакуації знизився з 0,54 до 0,31, що становить зменшення на 42,6 %. Це свідчить про ефективність ентропійно-керованої навігації в умовах часткової інформаційної ізоляції та дозволяє вважати такий підхід придатним для динамічного управління евакуаційними місіями в бойовому середовищі зі змінною структурною впорядкованістю.

У таблиці 4 показано результати динаміки ентропії в ключових зонах під час сценарію “Евакуація поранених”. Ці дані наочно ілюструють зменшення рівня невизначеності вздовж евакуаційного маршруту, що відображає ефективність адаптивного ентропійного управління.

Таблиця 4

Динаміка ентропії у сценарії “Евакуація поранених”

Час (с)	Сектор X (зона пораненого)	Сектор Y (маршрут обходу)	Сектор Z (тил/евакуаційна точка)
0	0,67	0,51	0,29
30	0,59	0,45	0,25
60	0,48	0,39	0,23
90	0,36	0,33	0,22
120	0,28	0,26	0,21

Графік динаміки ентропії в часі для трьох ключових секторів у сценарії “Евакуація поранених” (рис. 5, а) демонструє стабілізацію ситуації уздовж маршруту: від хаотичної зони пораненого (сектор X) до контрольованої евакуаційної точки (сектор Z). Графік на рисунку 5, б демонструє поступове зниження ентропії у критичних зонах і стабілізацію середовища вздовж усього евакуаційного маршруту.

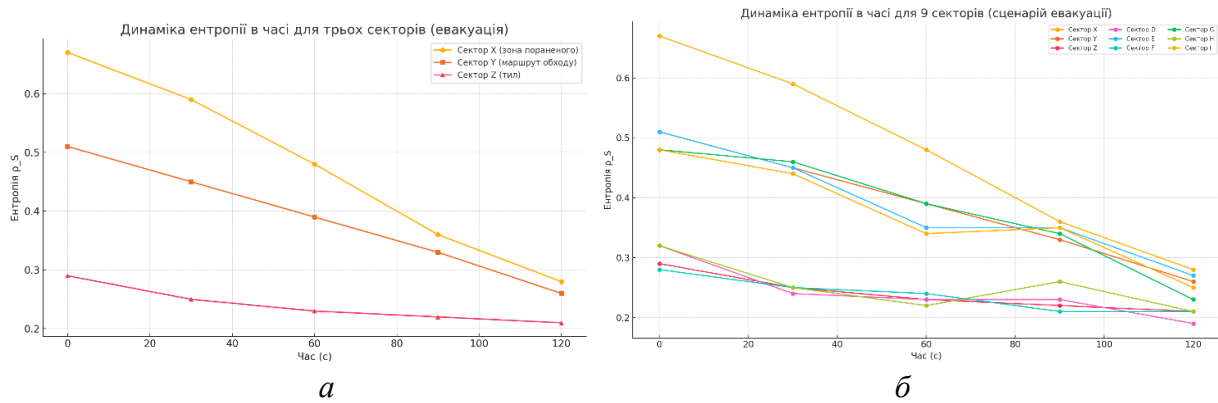
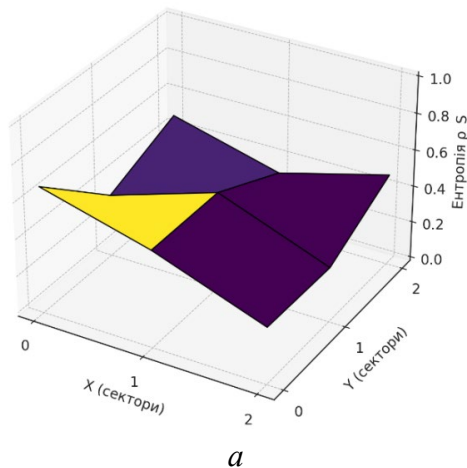


Рис. 5. Графік демонстрації зміни ентропії в часі бойового середовища у сценарії “Евакуація поранених”:
а – для трьох ключових зон; б – для дев'яти секторів

3D-візуалізація ентропійної карти на початку сценарію “Евакуація поранених” (рис. 6, а) показує підвищену ентропію в секторі X, зони, де перебуває поранений, та більш помірні значення в тилкових секторах. При цьому рисунок 6, б демонструє зниження ентропії вздовж маршруту переміщення, від зони вогневого ураження, тобто нестабільної зони пораненого до тилового безпечного сектору.

3D-візуалізація ентропійної карти (евакуація, $t = 0$ с)



3D-візуалізація ентропійної карти (евакуація, $t = 120$ с)

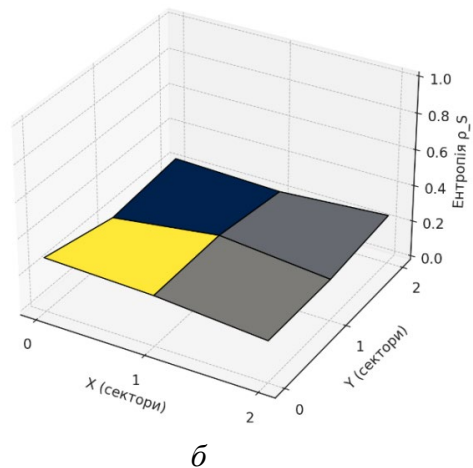


Рис. 6. 3D-візуалізація ентропійної карти сценарію “Евакуація поранених”:
а – на початковому етапі симуляції $t = 0$ с; б – на завершальному етапі симуляції при $t = 120$ с

Ця демонстрація створює чіткий контраст із фінальним станом і демонструє, як система впливає на просторову стабілізацію середовища. Це підтверджує ефективність динамічного маршрутизаційного реагування системи на ентропійні умови.

Об'єднана порівняльна таблиця 5 демонструє динаміку ентропії у характерних секторах для кожного з трьох бойових сценаріїв: оборони, атаки та евакуації. Вона дозволяє чітко

простежити, як змінюється рівень невизначеності в найбільш критичних точках під час реалізації різних типів бойових дій. У разі потреби можемо також побудувати порівняльний графік цих трьох ліній у часі.

Таблиця 5

Порівняльна таблиця ентропії для трьох бойових сценаріїв

Час (с)	Оборона Сектор А (ворожа активність)	Атака Сектор С (цільова позиція)	Евакуація Сектор Х (зона вогневого контакту)
0	0,25	0,31	0,67
30	0,52	0,58	0,59
60	0,83	0,81	0,48
90	0,55	0,49	0,36
120	0,42	0,36	0,28

А узагальнений порівняльний графік рівня ентропії у найбільш критичних точках для трьох бойових сценаріїв – оборони, атаки та евакуації пораненого – показано на рисунку 7.

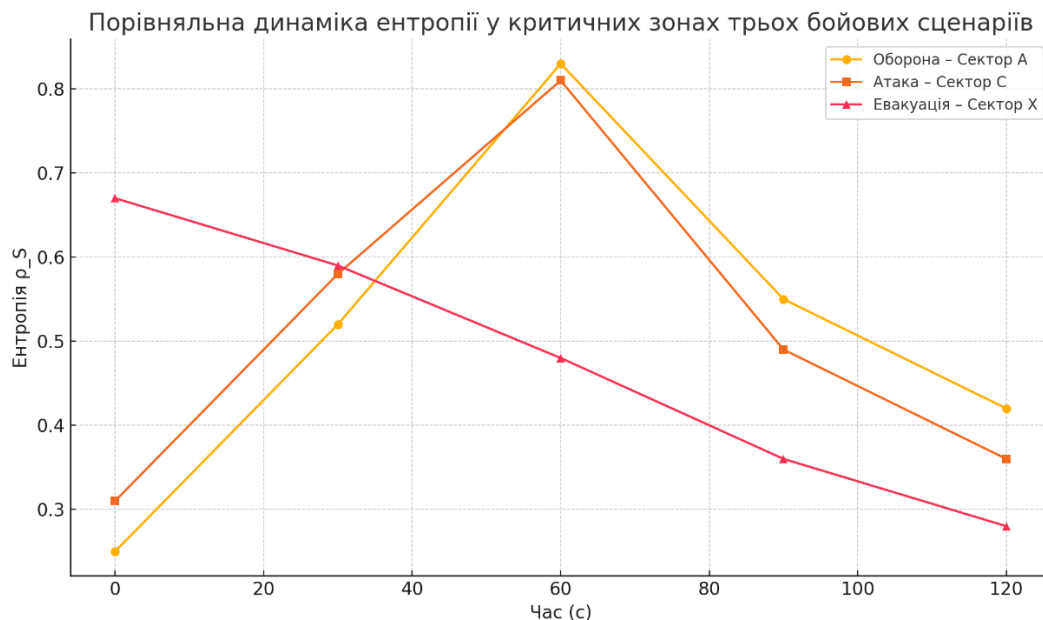


Рис. 7. Графік порівняльної динаміки ентропії у критичних зонах трьох бойових сценаріїв

Узагальнений графік наочно демонструє характер зростання й зниження невизначеності в часі залежно від типу місії та початкових умов.

Висновки та напрями подальших досліджень

У проведеному дослідженні обґрунтовано доцільність використання просторово-часової ентропії як операційної змінної для аналізу, оцінки та адаптивного управління бойовим середовищем. Розроблена модель дозволила поєднати термодинамічне трактування впорядкованості з практичною реалізацією в симуляційному середовищі Gazebo, демонструючи ефективність автономного реагування у трьох ключових сценаріях: оборони, атаки та евакуації. Досвід симуляцій підтвердив, що ентропійне управління забезпечує суттєве зменшення рівня невизначеності в критичних секторах, сприяючи покращенню ситуаційної обізнаності та зниженню ризику втрати контрольованості.

Разом з тим, результати роботи окреслюють і важливі перспективи розвитку даної парадигми. Подальші дослідження передбачають формалізацію різновидів ентропії, що відповідають структурним і функціональним особливостям різних типів бойових середовищ: відкритих, урбанізованих, напівструктурованих, а також динамічно змінних з урахуванням погоди, часу доби, інформаційних ускладнень. З цією метою пропонується ввести класифікацію на просторову, інформаційну, топологічну, когнітивну, взаємодійну та контекстуальну ентропії, кожна з яких фіксує окремий клас невизначеності. Крім того, доцільним є впровадження змінної ентропійної метрики, яка адаптивно підлаштовується під тип середовища та сценарій, автоматично переналаштовуючи ваги впливу відповідних ентропійних компонентів.

Такий підхід закладає основу для створення універсальної системи ентропійного керування у багатоплатформних роботизованих системах нового покоління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Подорожняк А. О., Земляна Г. В. Методи ефективного впливу на БПЛА // Збірник наукових праць. 2020. № 3 (45). С. 102–107.
2. Приходько Ю. І. Трансформація систем: основи теорії та методології. Київ: Інститут системного аналізу, 2018. 312 с.
3. Требін М. І., Требін О. В. Гібридна війна як нова українська реальність. Харків: Право, 2016. 254 с.
4. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. P. 379–423. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
5. Jaynes E. T. Information Theory and Statistical Mechanics // Physical Review. 1957. Vol. 106, No. 4. P. 620–630. DOI: 10.1103/PhysRev.106.620.
6. Quigley M., Conley K., Gerkey B. et al. ROS: An Open-Source Robot Operating System // ICRA Workshop on Open Source Software. 2009. Vol. 3. P. 1–6. [DOI не знайдено].
7. Parker G. Entropic Risk in Autonomous Systems: Modeling, Mapping, Mitigation // Journal of Defense Modeling and Simulation. 2021. Vol. 18, No. 3. P. 199–212. DOI: 10.1177/15485129211006492.
8. Zheng F., Liu J., Wang H. Entropy-Based Multi-Agent Coordination in Dynamic Battlefield Environments // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 8. P. 4211. DOI: 10.3390/s23084211.
9. Kobayashi T., Tanaka Y., Saito H. Real-Time Entropy Mapping for UAV Swarms Using Distributed Sensor Networks // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 65123–65134. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3183487.
10. Škoda P., Hruban P., Hromada M. Application of Thermodynamic Principles in Military Decision Support Systems // Military Technical Courier. 2020. Vol. 68, No. 4. P. 881–894. DOI: 10.5937/vojtehg68-23493.
11. Hodo E., Paspulis D., Triantafyllou A. Modeling Uncertainty in Cyber-Physical Battlefields Using Spatio-Informational Entropy // ACM Transactions on Cyber-Physical Systems. 2022. Vol. 6, No. 2. P. 1–20. DOI: 10.1145/3491234.
12. Li Y., Xu Z., Chen J. Dynamic Entropy Fields in Multi-Robot Systems for Adaptive Path Optimization // Robotics and Autonomous Systems. 2023. Vol. 163. P. 104360. DOI: 10.1016/j.robot.2023.104360.
13. Гончарук В. П. Ентропійні моделі управління складними динамічними об'єктами // Системні дослідження та інформаційні технології. 2019. № 1. С. 21–30. DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2019.1.02.