

# ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

УДК 681.518.54

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.1>

**Лаврик В. В.**, кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри прикладної фізики та вищої математики  
Київського національного університету технологій та дизайну  
ORCID: 0000-0002-6448-2470

**Сукало М. Л.**, доктор філософії, старший викладач кафедри  
інформаційних та комп'ютерних технологій,  
Київського національного університету технологій та дизайну  
ORCID: 0000-0003-3437-8290

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКОЇ КОМУНІКАЦІЇ В БАГАТОРОБОТНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ПСЕВДОАНАЛОГОВИХ СИГНАЛІВ

У статті представлено результати дослідження, присвяченого моделюванню комунікації у багатороботних системах з використанням нечітких (псевдоаналогових) сигналів. У сучасних умовах, коли групи автономних роботів функціонують у складних та динамічно змінюваних середовищах, надзвичайно актуальними є завдання забезпечення ефективного, стійкого та енергоощадного інформаційного обміну між роботами. Традиційні підходи до міжроботної комунікації – здебільшого дискретні – не дозволяють досягти високої адаптивності у шумних або обмежених за ресурсами середовищах. У відповідь на ці виклики автором запропоновано гібридну модель, яка імітує принципи комунікації, властиві біологічним системам, зокрема – варіабельність аналогових сигналів, що використовується у зграях тварин або колоніях комах.

Розроблена математична модель базується на концепції нечіткої логіки, де кожен сигнал має три параметри – амплітуду, частоту та тривалість – інтерпретовані у лінгвістичних категоріях (високий / середній / низький, тривожний / командний тощо). Ступінь відповідності сигналу визначається функціями належності, що дозволяє кожному роботу формувати гнучку реакцію залежно від контексту. Проведено серію експерименту у симуляційному середовищі, у якому «Леві» переслідували «Антилоп», що мали можливість обмінюватись сигналами про небезпеку або нестачу енергії. Було змодельовано три типи середовищ – без перешкод (базова дискретна модель), з втратами сигналів та зі спотворенням сигналів при псевдоаналоговій передачі.

Результати показали, що нечітка модель дозволяє досягти такого ж рівня виживання роботів, як і в умовах ідеальної передачі дискретних сигналів, але з енергоспоживанням, зниженим на 18 %. При цьому система виявилась стійкішою до втрат або спотворення сигналів. Застосування аналогоподібної комунікації з лінгвістичною інтерпретацією дозволяє уникати надмірної активації роботів, підвищуючи загальну ефективність групової поведінки. Запропонована модель може бути використана для побудови розподілених технічних систем у сферах пошуково-рятувальних операцій, розвідки, а також у сфері low-cost swarm robotics.

Стаття робить внесок у розвиток гнучких комунікаційних протоколів для роїв роботів, здатних адаптуватись до змін середовища без централізованого управління.

Ключові слова: роєва робототехніка, децентралізоване керування, нечітка логіка, розподілений інтелект.

**Lavrik V. V., Sukalo M. L. Mathematical modeling of fuzzy communication in multi-robot systems based on pseudoanalog signals**

The article presents the results of a study devoted to modeling communication in multi-robot systems using fuzzy (pseudo-analog) signals. In modern conditions, when groups of autonomous robots operate in complex and dynamically changing environments, the tasks of ensuring effective, stable and energy-saving information exchange between agents are extremely relevant. Traditional approaches to inter-robot communication – mostly discrete and based on rigid binary protocols – often do not allow achieving sufficient adaptability in noisy, unstructured or resource-limited environments. They tend to rely on constant signal retransmission and error-correction procedures, which increases energy costs and reduces real-time responsiveness.

In response to these challenges, the author proposed a hybrid model that imitates the principles of communication inherent in biological systems, in particular the variability and context dependence of analog signals used in flocks of birds, schools



© В. В. Лаврик, М. Л. Сукало, 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

---

of fish or insect colonies. Such natural communication is not strictly digital: it combines amplitude, frequency and temporal modulation, enabling organisms to convey uncertainty, urgency or intent even under external disturbances.

The developed mathematical model applies the concept of fuzzy logic, in which each transmitted signal is represented by three parameters – amplitude, frequency and duration – interpreted in linguistic categories such as high, medium, low, alert or coordination. Membership functions determine the degree to which a received signal corresponds to a specific linguistic value, enabling each agent to form a flexible response depending not only on the signal itself but also on the situational context. This reduces the need for exact matching of discrete messages and allows communication to remain functional even when signals are partially lost or distorted.

A series of experiments was conducted in a simulation environment representing predator–prey interactions, in which “Lions” acted as pursuing agents while “Antelope” could exchange messages about detected danger or decreasing energy reserves. Three categories of environments were modeled: a basic scenario with ideal discrete communication, a scenario with partial signal loss, and one with distortion introduced during pseudoanalog transmission. The results demonstrated that the fuzzy model enables maintaining the same level of agent survival and task completion efficiency as in ideal discrete communication, while reducing overall energy consumption by approximately 18 %. Furthermore, the swarm demonstrated significantly higher robustness under conditions of interference or incomplete data, as fuzzy interpretation prevented critical communication breakdowns.

The use of analog-like communication with linguistic interpretation decreases unnecessary agent activation, smooths collective decision-making and increases the overall efficiency of group behavior. The proposed model can be applied to the development of distributed technical systems for search-and-rescue missions, reconnaissance, environmental monitoring, agricultural robotics and low-cost swarm systems, where adaptability and resilience are more critical than precision. The article contributes to the advancement of flexible decentralized communication protocols capable of maintaining functionality under uncertainty and without centralized control.

Key words: swarm robotics, decentralized control, fuzzy logic, distributed intelligence.

**Постановка проблеми.** У сучасних робототехнічних системах зростає важливість ефективної організації управління групами автономних роботів, що працюють у складних та динамічно змінюваних середовищах. Забезпечення їх узгоджених дій є ключовим як для досягнення поставлених цілей, так і для підвищення надійності та стійкості до зовнішніх і внутрішніх збурень.

У роботі [1] наведено результати досліджень щодо організації групового управління роботами в умовах високої мінливості середовища. Виділено три основні підходи до такого управління: централізований, децентралізований та змішаний. Централізовані моделі простіші у реалізації, але вразливі до відмови центрального вузла та погано масштабуються. Децентралізовані системи стійкіші та краще масштабуються, проте складніші у забезпеченні узгодженості дій. Водночас відсутні універсальні підходи, які б забезпечували ефективність для різних задач – координації руху, побудови формацій, розподілу завдань чи організації взаємодії [2]. Складність моделей, велика кількість ступенів свободи та різноманітність сценаріїв обмежують можливість створення універсальних рішень.

Одним із напрямів подолання цих труднощів є використання моделей соціальної поведінки біологічних систем, де інформаційний обмін базується на локальній взаємодії найближчих сусідів. У роботах [3] показано ефективність природних механізмів комунікації в зграях птахів, косяках риб чи колоніях комах, які забезпечують стійкість до шумів і змін середовища. Загалом процес обробки сигналів у таких системах описується залежністю:

$$R_i = f(S, C), \quad (1)$$

де  $S$  – сукупність зовнішніх сигналів,  $C$  – внутрішній стан особини,  $R_i$  – множина можливих реакцій (дій).

Проте, як зазначено в [4], природні сигнали є аналоговими та розмитими, що ускладнює їх точну формалізацію. Один сигнал може виконувати кілька функцій, наприклад пісня зяблика одночасно маркує територію та приваблює самиць.

Отже, подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку методів інформаційного обміну між роботами на основі аналогових сигналів, що імітують біологічні механізми комунікації. Це дозволить створювати адаптивні та стійкі до збурень системи управління, здатні до самостійного пристосування без зовнішньої координації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Запропонований напрям є перспективним для розв’язання задач управління великими групами автономних роботів у реальних середовищах, особливо за умов обмеженої пропускну здатності каналів зв’язку та високої динамічності обстановки. Саме дослідженню таких підходів доцільно присвятити подальші наукові роботи.

У роботі [5] наведено результати досліджень щодо організації комунікацій у розподілених технічних системах, зокрема групах роботів. Основну увагу приділено розробці мов для обміну даними, каналів зв’язку та комунікаційних протоколів. У [6] розглянуто ІК-канал обміну даними у великих групах роботів, а в [7] – спеціалізовані мови типу SWARMORPH-script, орієнтовані на вирішення конкретних задач у ройових системах. Також досліджено можливість використання традиційних протоколів, таких як CSMA/CD, та спеціалізованих рішень для узгодженого руху рою роботів [8].

Термін «рой роботів» сформувався у 1990-х роках на основі концепції Swarm Intelligence, запропонованої Beni та Wang у 1989 році для опису взаємодії великої кількості простих агентів [9]. Систематичні дослідження цього напрямку були започатковані E. Şahin, який у 2005 році дав одне з перших визначень swarm robotics та підкреслив значення природних механізмів колективної поведінки.

Проте й нині залишаються невирішені питання, передусім методологічні, що пов'язані з принциповими відмінностями між технічними й біологічними системами. До них належать апаратні обмеження, відсутність можливості повноцінної аналогової передачі сигналів, нестача сенсорних здатностей, подібних до рецепторів живих організмів, а також вимога зберігати дешевизну конструкції для великих груп роботів.

Одним з можливих шляхів подолання цих обмежень є використання принципів етології, зокрема ідеї інваріантної форми сигналу. У роботі [10] підкреслено роль варіабельності сигналів у біологічних системах для підвищення стійкості передачі інформації. Однак у технічних системах аналогові канали є обмеженими, тому виникає потреба у їх імітації на основі дискретних механізмів.

У цій роботі запропоновано новий підхід до міжагентної комунікації, що ґрунтується на імітації аналогових сигналів через дискретні канали зв'язку. Створена математична модель нечіткої (псевдоаналогової) комунікації враховує амплітуду, частоту та тривалість сигналу, забезпечуючи контекстно залежну реакцію агентів без централізованого управління.

Таким чином, модель псевдоаналогової міжроботної комунікації є перспективним інструментом для побудови адаптивних, стійких і енергоефективних багатороботних систем, здатних працювати в умовах невизначеності та інформаційних втрат. Вона відкриває можливості для подальшого розвитку нечітких протоколів взаємодії у децентралізованих робототехнічних платформах.

**Мета дослідження.** Метою даної статті є розробка та дослідження математичної моделі псевдоаналогової (нечіткої) комунікації в багатороботних системах, що функціонують у складних та зашумлених середовищах для підвищення енергетичної ефективності, стійкості до втрат сигналів та адаптивності до взаємодії рухомих роботів.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження.**

##### *1. Організація комунікації в групі роботів*

У багатороботних системах навіть за спрощеної конструкції кожен робот повинен орієнтуватися відносно сусідів у межах радіуса прийому сигналів, що забезпечує локальну взаємодію та координацію. Для цього робот має визначати відносне положення інших роботів, наприклад «робот N знаходиться зліва». Це може бути реалізовано через визначення координат за допомогою зовнішніх маяків [11] або шляхом обчислення власного положення з використанням енкодерів та коригувальних алгоритмів [12].

Схематичний принцип визначення напрямку наведено на рис. 1: робот N орієнтується вперед і поділяє простір на чотири сектори – вперед, назад, ліворуч, праворуч. Якщо сигнал від робота K надходить, наприклад, правим приймачем, робот N робить висновок про розташування K праворуч. Цей підхід забезпечує базову просторову орієнтацію без складних сенсорів або глобальних координат.

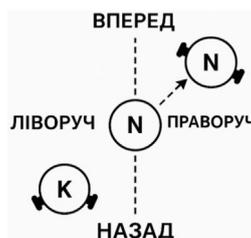


Рис. 1. Основні визначення відносного місця розташування сусіднього робота

Проте координатні методи часто потребують додаткового обладнання та значних обчислювальних ресурсів, тому для простих платформ доцільним є використання орієнтації відносно власного корпусу робота. Одним із найпростіших варіантів реалізації є направлена передача та прийом сигналів. Така схема застосована, наприклад, у платформі Jasmine [13], де використовуються декілька напрямлених приймачів. Використання чотирьох приймальних модулів з полем огляду близько 90° дозволяє роботам визначати один одного за принципом секторного аналізу, знижуючи вимоги до обчислювальних ресурсів.

Щодо каналів зв'язку, аналіз сучасних підходів показує домінування радіозв'язку (Wi-Fi, Ad hoc, сенсорні мережі). Однак радіоканал має недолік – відсутність природної спрямованої передачі, що обмежує можливості реалізації локальної взаємодії рою. У якості альтернатив розглядаються інфрачервоний та звуковий канали. У роботі [10] показано ефективність ІЧ-каналу для локальної взаємодії. На рис. 2 подано схеми ІЧ та акустичного каналів: перший забезпечує спрямовану передачу у вигляді вузького конуса випромінювання, другий – передачу акустично модульованих сигналів, які можуть кодувати інформацію за частотою, тривалістю чи амплітудою.

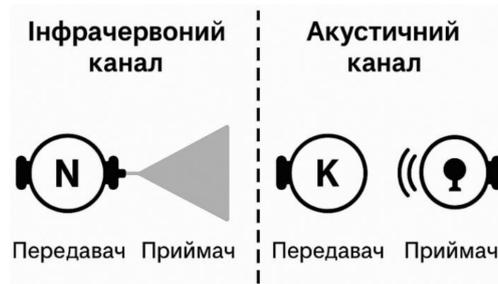


Рис. 2. Структура інфрачервоного та акустичного каналів зв'язку між роботами

Звукові методи також досліджено в роботі [14], де запропоновано формальну мовну модель, у якій кожен символ передається набором багаточастотних сигналів тривалістю 150 мс. Іншим прикладом є ультразвукова комунікація, використана в іграшці Furby. Обидва канали придатні для ройових систем, де пропускна здатність визначається швидкістю роботи та вимогами до часу реакції, який не повинен перевищувати 0,2 с.

У межах запропонованого підходу канал зв'язку використовується не для передачі цифрових повідомлень, а для емулявання аналогових сигналів. Передаються параметри – амплітуда, частота, тривалість, – які формують нечіткий псевдоаналоговий сигнал, що дозволяє роботам інтерпретувати його та формувати поведінкову реакцію без складних комунікаційних протоколів.

## 2. Математична модель взаємодії та комунікації в багатороботних системах

Запропонована схема взаємодії та комунікації в групі роботів ґрунтується на гібридному підході, що поєднує дискретну передачу даних з елементами аналогового кодування. Кожен робот оснащений простим приймально-передавальним модулем, здатним розпізнавати варіації сигналу та інтерпретувати їх як зміну пріоритету або ступеня важливості повідомлення (рис. 3).

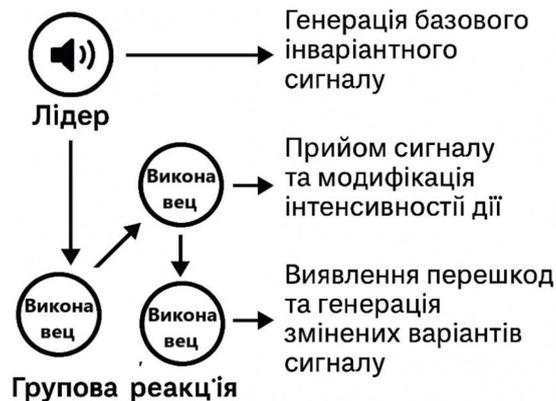


Рис. 3. Структура взаємодії та комунікації в групі роботів

Робота системи відбувається у кілька етапів. Спочатку лідер генерує базовий інваріантний сигнал, що ініціює спільну дію (наприклад, старт руху). Підлеглі роботи приймають цей сигнал і відповідно до його параметрів визначають інтенсивність виконання команди. Якщо окремі роботи фіксують перешкоди, вони формують змінений варіант сигналу – із збільшеною амплітудою чи тривалістю – передаючи інформацію про загрозу сусідам або лідеру. Подальша поведінка групи визначається інтеграцією всіх отриманих повідомлень, що забезпечує колективне рішення щодо корекції руху або зміни тактики.

Для досягнення природоподібної взаємодії використовується модель обробки аналогових сигналів із нечіткою інтерпретацією. Сигнал описується набором параметрів:

$$S(t) = \{A(t), f(t), d(t)\}, \quad (2)$$

де:

- $A(t)$  – амплітуда сигналу (відповідає інтенсивності або ступеню терміновості);
- $f(t)$  – несуча частота сигналу (якісна характеристика: тип чи категорія повідомлення);
- $d(t)$  – тривалість сигналу (часова розтягнутість або значущість).

Для кожного лінгвістичного терму визначається функція належності  $\mu(x)$ , яка дозволяє оцінити ступінь відповідності значення сигналу певній категорії.

Кожен робот  $R_p$ , отримуючи сигнал  $S_j(t)$  від робота-сусіда  $R_p$ , формує оцінку важливості сигналу за допомогою композиційної функції:

$$P_{ij}(t) = \mu_A(A_j(t)) \cdot \mu_f(f_j(t)) \cdot \mu_d(d_j(t)), \quad (3)$$

де  $P_{ij}(t) \in [0, 1]$  – ступінь релевантності сигналу для робота  $R_i$ .

Рисунок 4 демонструє узагальнену блок-схему обробки аналогових сигналів. Модель включає: прийом сигналу, перетворення параметрів у лінгвістичні оцінки, вибір реакції і виконання дії з інтенсивністю, пропорційною амплітуді сигналу. Такий підхід забезпечує адаптивність і дозволяє відмовитися від жорсткого програмування всіх можливих ситуацій.



Рис. 4. Узагальнена блок-схема нечіткої моделі обробки аналогових сигналів у рою роботів

Застосування дискретного каналу з варіативними характеристиками сигналу дає змогу моделювати аналогову комунікацію, підвищуючи стійкість системи до завад та забезпечуючи більш інформативний обмін. Це обґрунтовує необхідність подальших досліджень у напрямку розробки методів комунікації в роботизованих групах, які імітують властивості природних аналогових сигналів.

### 3. Загальний опис задачі та експериментальна постановка

Для дослідження переваг нечіткої (псевдоаналогової) комунікації в умовах колективної поведінки було проведено серію експериментів з використанням імітаційного моделювання. Модель описувала взаємодію рою роботів, що переміщувались по тороїдальній поверхні. Розглядалися два типи агентів: «леви», які переслідували інші об'єкти, та «антилопи», що намагалися уникнути переслідування. Кожен робот мав запас енергії, який витрачався на рух. У випадку захоплення «антилопи» її енергія передавалася «леву», а сама вона вважалась спійманою.

Роботи взаємодіяли лише локально. «Леви» діяли автономно і сигналів не передавали, тоді як «антилопи» мали два типи широкомовних повідомлень: сигнал «небезпека» при виявленні «лева» та сигнал «прохання про допомогу» при нестачі енергії. Обидва повідомлення передбачали лише ретрансляцію.

Поведінкові правила «антилоп» включали: випадкове блукання у нормальному стані, передачу сигналу «небезпека» та втечу при візуальному контакті з «левом», диференційовану реакцію на отриманий сигнал залежно від умов експерименту, а також наближення до джерела сигналу «прохання» для перерозподілу енергії. Пріоритетність сигналів визначалася змістом («небезпека» завжди домінує) та інтенсивністю.

У всіх експериментах використовувалися єдині параметри руху: швидкість «лева» – 6, швидкість «антилопи» – 4, радіус огляду «лева» – 12, радіус огляду/чутності «антилопи» – 24. Така асиметрія забезпечувала перевагу колективної ретрансляції сигналів.

Було розглянуто дві стратегії передачі інформації:

- дискретна модель, у якій сигнал або є, або відсутній, і всі роботи в зоні дії реагують однаково;
- аналогова (нечітка) модель, де сигнал має параметри інтенсивності та тривалості, що формують ступінь його важливості.

У дискретному випадку будь-який прийнятий сигнал спричиняв масову активацію роботів, що приводило до підвищених енерговитрат. Натомість аналогова модель дозволяла формувати градуйовану реакцію – ближчі агенти активувались сильніше, віддалені могли ігнорувати сигнал або реагувати слабше. Це зменшувало непродуктивне споживання енергії.

Аналогова інтерпретація виявилась також суттєво стійкішою до завад. Якщо дискретний сигнал втрачався або спотворювався, реакція була відсутньою. Псевдоаналогова система завдяки використанню функцій належності могла розпізнати спотворений сигнал із певним рівнем упевненості та прийняти відповідне рішення.

На рисунку 5 подано порівняння моделей: зліва показано дискретне поширення сигналів з різкою межею зони активності; справа – аналогова модель з плавним спаданням інтенсивності, яка забезпечує природнішу й енергоефективнішу колективну поведінку.

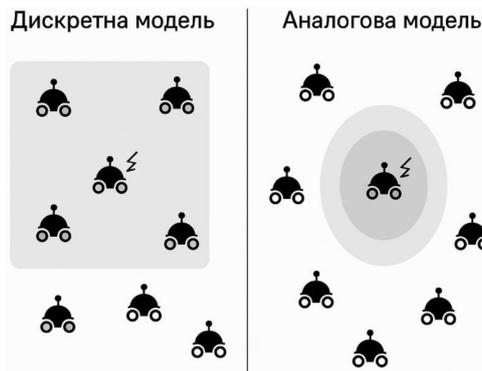


Рис. 5. Порівняння дискретної та аналогової моделі поширення сигналів у рою роботів

Експерименти підтвердили, що системи, побудовані на аналогових сигналах з нечіткою семантикою, забезпечують вищу надійність і адаптивність комунікації в умовах завдань та динамічних змін середовища.

#### 4. Експериментальне дослідження ефективності псевдоаналогової комунікації

З метою забезпечення оптимальних результатів усі серії експерименту були реалізовані за однакових параметрів початкової конфігурації рою роботів:

- кількість роботів-«левів» – 12;
- кількість роботів-«антилоп» – 35.

У таблиці 1 показана реалізація трьох серій експерименту, кожна з яких відрізнялась підходом до моделювання сигналів.

Експеримент проводився у середовищі імітаційного моделювання «Webots» [15] протягом 500 тактів, з подальшою агрегацією результатів за 10 прогонів кожної серії. У таблиці 2 наведено середні результати щодо кількості вцілілих роботів («антилоп») та рівня залишкової енергії в системі.

Таблиця 1

#### Умови проведення серій експерименту за типом сигналів та характеристиками перешкод

Серія	Тип сигналів	Втрата / спотворення сигналів	Особливість
Серія 1	Дискретні	Відсутні	Базовий контроль (однакова реакція на всі сигнали)
Серія 2	Дискретні	50 % втрат	Імітація перешкод, частина «антилоп» не реагує
Серія 3	Псевдоаналогові (нечіткі)	50 % сигналів – спотворені	Реакція залежить від інтенсивності сигналу

Таблиця 2

#### Середні результати експерименту для кожної серії (усереднено по 10 запусків)

Стан системи	Серія 1 (базова)	Серія 2 (з втратами)	Серія 3 (нечіткі сигнали)
Кількість «антилоп» після 600 тактів	20 (67 %)	16 (53 %)	20 (67 %)
Загальний запас енергії (що залишився)*	2601 (22 %) найбільше витрачено	3800 (31 %) найменше витрачено	3070 (25 %) – на ~18 % менше за серію 1

\* Чим більше залишкової енергії – тим менше її було витрачено в процесі роботи рою.

На рисунку 7 представлена графічне порівняння результатів експерименту.

У першій серії експерименту було досягнуто високого рівня збереження роботів, проте це супроводжувалося значним енергоспоживанням. Причиною цього є те, що всі роботи реагували на сигнали однаково, без урахування їхньої сили або важливості.

У другій серії, в умовах втрат сигналів, кількість врятованих роботів зменшилася, оскільки не всі «антилоп» встигали зреагувати на небезпеку. Водночас енергоспоживання виявилось меншим, адже не кожен робот активувався у відповідь на сигнал.

У третій серії, де застосовувалася нечітка (псевдоаналогова) передача сигналів, спостерігався найкращий баланс. Рівень виживаності залишився таким самим, як у першій серії, але енергоспоживання зменшилося на 18 % завдяки гнучкому реагуванню на сигнали з різною інтенсивністю.

Таким чином, дослідження показало, що використання нечітких сигналів у комунікації між роботами рою роботів дозволяє значно підвищити її ефективність. По-перше, знижується надмірне витрачання енергії, яке виникає при одноманітному реагуванні на будь-який сигнал. По-друге, система краще пристосовується

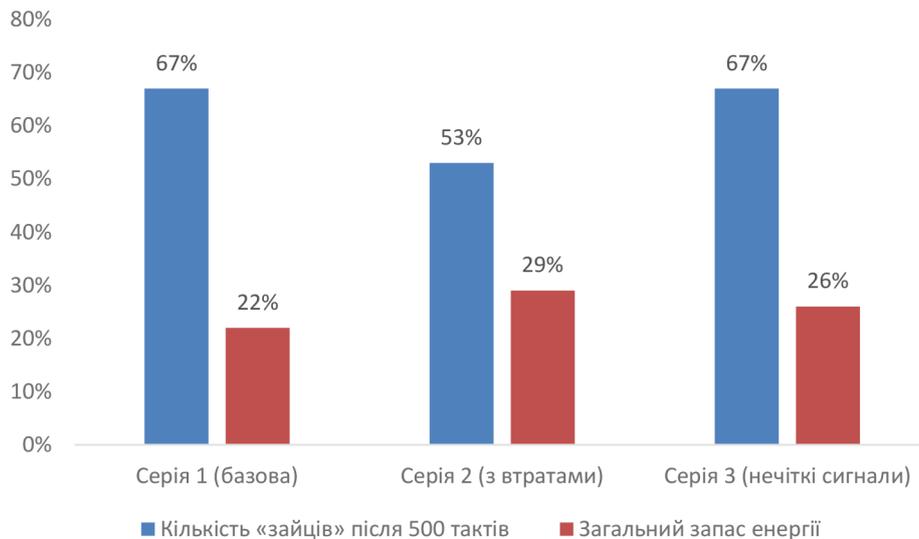


Рис. 7. Порівняння ефективності різних моделей комунікації у роях роботів

до умов із втратами або спотворенням сигналів. По-третє, забезпечується узгоджена та енергоефективна поведінка всієї групи роботів.

**Висновки.** Проведене дослідження підтверджує доцільність та ефективність використання нечіткої (псевдоаналогової) комунікації як засобу координації поведінки в багатороботних системах, що діють у складних, зашумлених та динамічних середовищах.

Запропонована модель, натхненна принципами комунікації біологічних систем, використовує варіативні сигнали з лінгвістичною інтерпретацією параметрів, що забезпечує гнучке, адаптивне реагування на зміни в оточенні. Система виявила здатність до варіювання інтенсивності дій залежно від сили, тривалості та частоти сигналів, що сприяє зменшенню енергоспоживання, зокрема до 18 % у порівнянні з традиційними дискретними моделями. Крім того, нечіткий підхід забезпечує стійкість до втрат і спотворень сигналів, зберігаючи релевантність отриманої інформації навіть у шумових умовах.

Локальна природа взаємодії між агентами дозволяє уникнути потреби в глобальному позиціонуванні або централізованому управлінні, що суттєво спрощує реалізацію системи на апаратному рівні. Застосування направлених приймачів для визначення напрямку сигналу забезпечує мінімізацію обчислювальних витрат, що робить запропоновану модель придатною для реалізації на недорогих платформах із обмеженими ресурсами.

Отримані результати свідчать про перспективність розробленого підходу та створюють підґрунтя для подальшого вдосконалення методів комунікації в автономних роботизованих системах.

#### Список використаних джерел:

1. Brambilla M., Ferrante E., Birattari M., Dorigo M. Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective. *Swarm Intelligence*. 2013. Vol. 7, No. 1. P. 1–41. DOI: 10.1007/s11721-012-0075
2. Verma J. K., Ranga V. Multi-Robot Coordination Analysis, Taxonomy, Challenges and Future Scope. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2021. Vol. 102. Article No. 10. DOI: 10.1007/s10846-021-01378-2
3. Rasouli S., Dautenhahn K., Nehaniv C. L. Simulation of a Bio-Inspired Flocking-Based Aggregation Behaviour in Swarm Robotics. *Biomimetics*. 2024. Vol. 9, No. 11. Article No. 668. DOI: 10.3390/biomimetics9110668
4. Ковтунов Ю., Макогон Г., Ісаков О., Бабкін Ю., Калінін І., Лацута Р. Використання математичного апарату нечіткої логіки для фаззифікації та алгоритмізації роботи системи інтерактивного моніторингу транспортних комунікацій. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4, № 3. С. 64–68. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.064>
5. Kornienko S., Kornienko O. Minimalistic approach towards communication and perception in microrobotic swarms. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2005. P. 2228–2234. DOI: 10.1109/IROS.2005.1545594
6. Kernbach S. Swarmrobot.org – Open-hardware microrobotic project for large-scale artificial swarms. *arXiv preprint*, 2011. Access mode: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1110.5762>
7. Montanier J., Faigl J. Language evolution in swarm robotics: A perspective. *Frontiers in Robotics and AI*. 2020. Vol. 7. Article No. 12. DOI: 10.3389/frobt.2020.00012
8. Лаврик В., Скідан В., Сукало М., Воливач А., Лебеденко Ю. Використання IoT пристроїв для моніторингу стану рослин в сільському господарстві. *Інформаційні технології та суспільство*. 2025. № 1 (16). С. 116–122. DOI: 10.32689/maup.it.2025.1.15

9. Beni G., Wang J. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. In: *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?* Berlin: Springer, 1989. P. 703–712. DOI: 10.1007/978-3-642-58069-7\_38
10. Moore R. K., Marxer R., Thill S. Vocal interactivity in–and–between humans, animals, and robots. *Frontiers in Robotics and AI*. 2016. Vol. 3. Article No. 61. DOI: 10.3389/frobt.2016.00061
11. AlHadithi B. M., Pastor C. CostEffective Localization of Mobile Robots Using Ultrasound Beacons and Differential Time-of-Flight Measurement. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 17. Article No. 7597. DOI: 10.3390/app14177597
12. Goel P., Roumeliotis S. I., Sukhatme G. S. Robust Localization Using Relative and Absolute Position Estimates. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2003. P. 1065–1071. DOI: 10.1109/IROS.2003.124883
13. Kernbach S. et al. Towards applied swarm robotics: current limitations and enablers. *Swarm Intelligence*. 2021. Vol. 15, No. 4. P. 223–245. DOI: 10.1007/s11721-021-00189-x
14. Li Z., Yu Y., Horoshenkov K. V. A comparison of the performance of four acoustic modulation techniques for robot communication in pipes. *The International Journal of Acoustics and Vibration*. 2023. Vol. 28, No. 1. P. 98–116. DOI: 10.20855/ijav.2023.28.11930
15. Cyberbotics Ltd. Webots: Open-source robot simulator. URL: <https://cyberbotics.com>

#### References:

1. Brambilla, M., Ferrante, E., Birattari, M., Dorigo, M. (2013). Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective. *Swarm Intelligence*. Vol. 7, No. 1. P. 1–41. DOI: 10.1007/s11721-012-0075
2. Verma, J. K., Ranga, V. (2021). Multi-Robot Coordination Analysis, Taxonomy, Challenges and Future Scope. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. Vol. 102. Article No. 10. DOI: 10.1007/s10846-021-01378-2
3. Rasouli, S., Dautenhahn, K., Nehaniv, C. L. (2024). Simulation of a Bio-Inspired Flocking-Based Aggregation Behaviour in Swarm Robotics. *Biomimetics*. Vol. 9, No. 11. Article No. 668. DOI: 10.3390/biomimetics9110668
4. Kovtunov, Yu., Makohon, H., Isakov, O., Babkin, Yu., Kalinin, I., Latsuta, R. (2020). Vykorystannia matematychnoho aparatu nechitkoi lohiky dlia fazzyfikatsii ta alhorytmizatsii roboty systemy interaktyvnoho monitorynhu transportnykh komunikatsii. *Suchasni informatsiini systemy*. T. 4, № 3. S. 64–68. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.064>
5. Kornienko, S., Kornienko, O. (2005). Minimalistic approach towards communication and perception in microrobotic swarms. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. P. 2228–2234. DOI: 10.1109/IROS.2005.1545594
6. Kernbach, S. (2011). Swarmrobot.org – Open-hardware microrobotic project for large-scale artificial swarms. *arXiv preprint*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1110.5762>
7. Montanier, J., Faigl, J. (2020). Language evolution in swarm robotics: A perspective. *Frontiers in Robotics and AI*. Vol. 7. Article No. 12. DOI: 10.3389/frobt.2020.00012
8. Lavrik, V., Skidan, V., Sukalo, M., Volivach, A., Lebedenko, Yu. (2025). Vykorystannia IoT prystroiv dlia monitorynhu stanu roslyn v silskomu hospodarstvi [Using IoT devices to monitor plant health in agriculture]. *Informatsiini tekhnologii ta suspilstvo*. № 1 (16). S. 116–122. DOI: 10.32689/maup.it.2025.1.15
9. Beni, G., Wang, J. (1989). Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. In: *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?* Berlin: Springer, P. 703–712. DOI: 10.1007/978-3-642-58069-7\_38
10. Moore, R. K., Marxer, R., Thill, S. (2016). Vocal interactivity in–and–between humans, animals, and robots. *Frontiers in Robotics and AI*. Vol. 3. Article No. 61. DOI: 10.3389/frobt.2016.00061
11. AlHadithi, B. M., Pastor, C. (2024). CostEffective Localization of Mobile Robots Using Ultrasound Beacons and Differential Time-of-Flight Measurement. *Applied Sciences*. Vol. 14, No. 17. Article No. 7597. DOI: 10.3390/app14177597
12. Goel, P., Roumeliotis, S. I., Sukhatme, G. S. (2003). Robust Localization Using Relative and Absolute Position Estimates. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. P. 1065–1071. DOI: 10.1109/IROS.2003.124883
13. Kernbach, S. et al. (2021). Towards applied swarm robotics: current limitations and enablers. *Swarm Intelligence*. Vol. 15, No. 4. P. 223–245. DOI: 10.1007/s11721-021-00189-x
14. Li, Z., Yu, Y., Horoshenkov, K. V. (2023). A comparison of the performance of four acoustic modulation techniques for robot communication in pipes. *The International Journal of Acoustics and Vibration*. Vol. 28, No. 1. P. 98–116. DOI: 10.20855/ijav.2023.28.11930
15. Cyberbotics Ltd. Webots: Open-source robot simulator. [Electronic resource]. – Retrieved from: <https://cyberbotics.com>.

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026