

DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2026.28.2.363204>

УДК 004.89:004.942:623.746

**О. Г. Додонов, В. О. Додонов, В. Ф. Залужний,
К. О. Кравчук, І. В. Ізварін**

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Кооперація різнотипних роїв безпілотних систем при виконанні місій

Розглянуто задачу кооперації різнотипних роїв безпілотних систем під час виконання спільних місій. Запропоновано багаторівневий підхід, що ґрунтується на представленні різнотипних роїв безпілотних систем як об'єднаної системи у вигляді «рою роїв» (Swarm of Swarms), який охоплює зовнішній, міжроєвий і внутрішньороєвий рівні управління. Сформульовано загальні задачі, які потрібно вирішити для кооперації роїв. Показано, що на кожному етапі виконання задачі роями виникає специфічний клас функціональних задач, які потребують застосування математичних методів, алгоритмів і засобів комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: рій дронів, кооперація, мультиагентні системи, планування місій, комп'ютерне моделювання, Swarm of Swarms, System of Systems.

Вступ

Сучасні військові та спеціальні операції характеризуються дедалі ширшим використанням безпілотних систем, об'єднаних у рої. Спостерігається перехід від застосування окремих дронів, до груп однотипних дронів і далі до груп і гетерогенних (різнотипних) роїв, що включають засоби розвідки, ураження, радіоелектронної боротьби та іншого призначення.

Ключовим фактором ефективності таких систем стає не лише кількість елементів рою, а також рівень їхньої кооперації, що забезпечує узгоджене виконання місій в умовах невизначеності та активної протидії. Методологічним підґрунтям дослідження є еволюція від концепції System of Systems (SoS) до парадигми Swarm of Swarms у сфері автономних роботизованих систем.

Прийнято, що Система Систем — System of Systems — це об'єднання незалежних функціональних систем у більшу, складнішу структуру, що забезпечує унікальні можливості, недоступні для кожної системи окремо. Вони характеризуються самостійним керуванням, географічною розподіленістю і еволюційним розвитком.

© О. Г. Додонов, В. О. Додонов, В. Ф. Залужний, К. О. Кравчук, І. В. Ізварін

Концепція SoS передбачає інтеграцію незалежних, функціонально різнорідних систем для досягнення спільної мети. У військовій сфері це проявляється в об'єднанні засобів протиповітряної оборони, радіоелектронної боротьби, розвідки та вогневого ураження — в єдині функціональні контури управління.

Подальший розвиток цієї парадигми приводить до формування концепції «рою роїв» (**Swarm of Swarms**), яка зберігає принципи гетерогенності та інтеграції, але доповнює їх новими властивостями (рис. 1):

- децентралізованого управління;
- самоорганізації;
- адаптивності;
- масштабованості.

На відміну від класичних SoS, де інтеграція досягається переважно на рівні систем, у концепції **Swarm of Swarms** ключову роль відіграє *кооперація на рівні поведінки*.

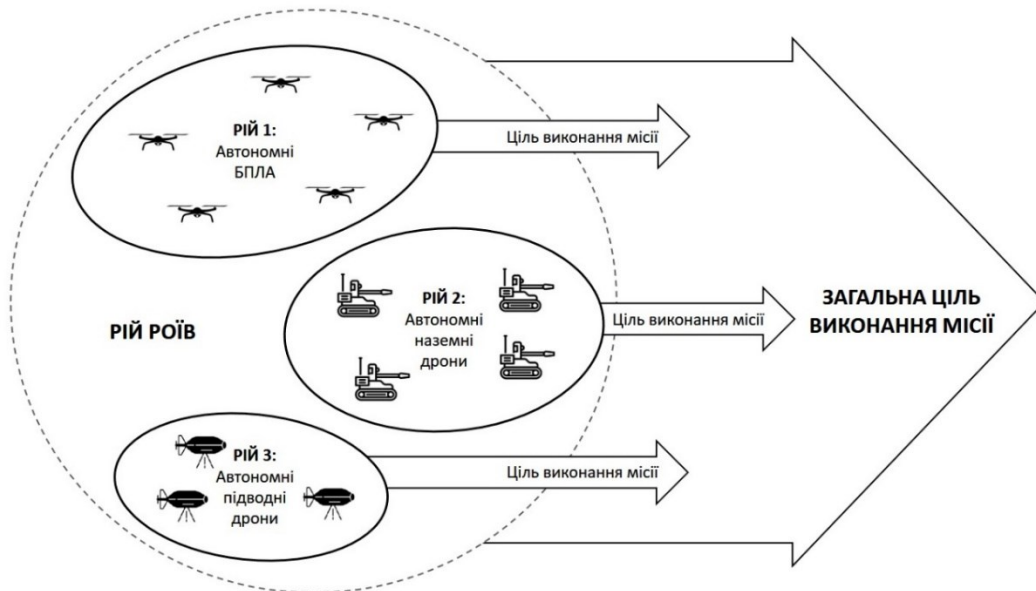


Рис. 1. Рій роїв

Крім того, на відміну від ієрархічних або централізованих SoS, системи типу «рій роїв» функціонують на основі розподіленого інтелекту, що забезпечує:

- підвищену стійкість до втрат елементів;
- збереження функціональності при порушенні зв'язку;
- здатність до адаптації у динамічному середовищі (рис. 2).

Таким чином, кооперація різнотипних роїв безпілотних систем може розглядатися як *логічне продовження та розвиток концепції SoS*, орієнтоване на створення інтелектуальних автономних колективів.

Незважаючи на наявність значної кількості досліджень у сфері мультиагентних систем та роєвого інтелекту, існуючі підходи переважно зосереджені на управлінні окремими роями або вирішенні часткових задач. Водночас задачі *кооперації різнотипних роїв на всьому циклі місії* залишаються недостатньо дослідженими.

У зв'язку з цим, метою напрямку дослідницьких робіт є виявлення, формулювання, та вирішення задач, що потрібні для кооперації різнотипних роїв безпілот-

них систем при виконанні місії, що враховує багаторівневу структуру системи та повний цикл задач кооперації — від пошуку рішень до їхньої реалізації із використанням засобів комп'ютерної підтримки.

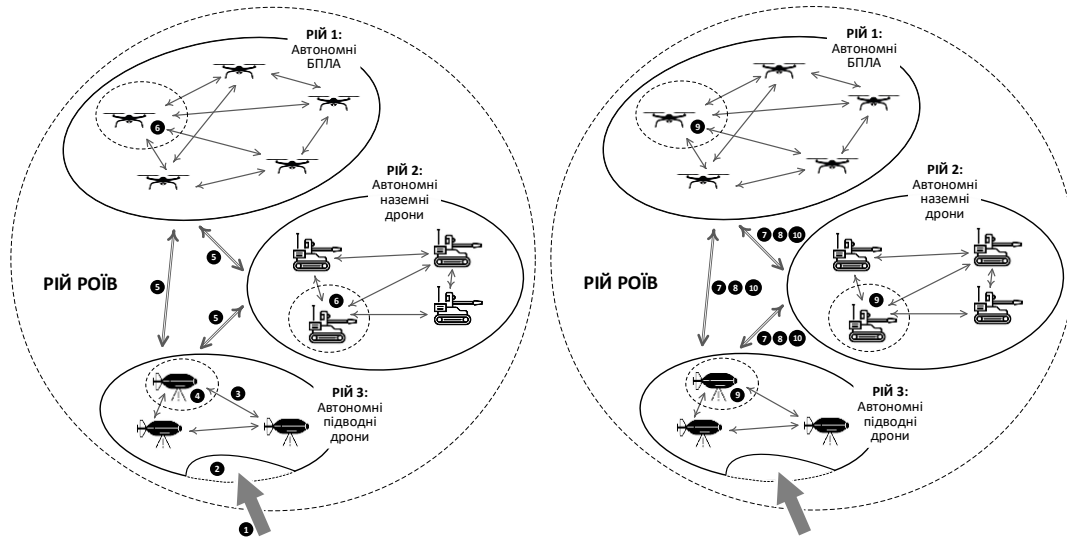


Рис. 2. Адаптація рою роїв до зовнішніх змін: 1 — зовнішній вплив; 2 — вплив на рій 3; 3 — внутрішні рішення про локальне реагування на зовнішній вплив; 4 — вибір елементів рою для задач комунікації; 5 — комунікація з іншими роями; 6 — локальні реагування інших роїв; 7 — формування колективного рішення про реагування рою роїв на зовнішній вплив; 8 — комунікація про реагування рою роїв; 9 — реагування кожного рою; 10 — комунікація про завершення реагування

Від SoS (System of Systems) до «Рою роїв» (Swarm of Swarms)

Подальший розвиток концепції Системи Систем (System of Systems) пов'язаний із переходом до моделі «рою роїв» (Swarm of Swarms), у якій фокус зміщується від ієрархічного підпорядкування та мережецентричної взаємодії до механізмів самоорганізації і розподіленого управління.

У межах цього підходу зберігається принцип інтеграції різнорідних підсистем, однак змінюється характер їхньої взаємодії — від жорстко визначених структур до динамічних, адаптивних об'єднань.

Концепція кооперації різнотипних роїв

Пропонується розглядати систему, що складається з декількох роїв («рій роїв»), як розподілену структуру, яка включає три рівні управління (рис. 3).

Внутрішньоройовий рівень (А). На даному рівні реалізуються:

- розподіл задач між елементами рою;
- маршрутизація;
- локальна координація;
- адаптація до змін.

Міжройовий рівень (Б). На даному рівні вирішуються задачі:

- декомпозиції місії;
- розподілу задач між роями;

- координації дій;
- синхронізації у часі та просторі;
- обміну інформацією.

Цей рівень визначає тактичний рівень виконання місії.

Зовнішній рівень (В). На даному рівні вирішуються такі задачі:

- постановка цілей місії;
- початкове формування роїв;
- ініціація виконання місії.

Цей рівень визначає глобальну стратегію виконання місії.

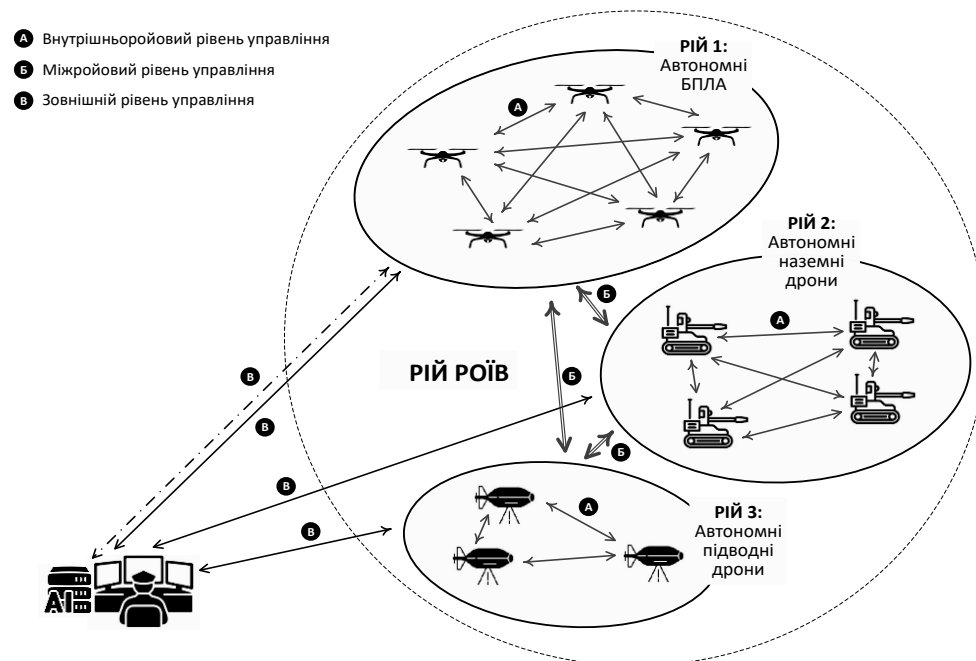


Рис. 3. Рівні управління рою роїв

Ключовими властивостями систем типу «рій роїв» є наступні.

Децентралізоване управління. Управління системою здійснюється без жорстко визначеного централізованого вузла, на основі розподілених алгоритмів прийняття рішень. Кожен підрій або агент володіє частковою автономією та здатністю діяти відповідно до локальної інформації та загального наміру місії. Глобальна узгодженість поведінки досягається через обмін інформацією, протоколи взаємодії та механізми узгодження.

Самоорганізація. Здатність системи формувати структуру взаємодії без зовнішнього керування, адаптуючись до змін середовища та складу системи.

Адаптивність. Можливість динамічної зміни поведінки, розподілу задач і структури кооперації відповідно до умов виконання місії.

Масштабованість. На відміну від класичних SoS, що часто мають фіксовану або обмежено гнучку архітектуру, «рій роїв» дозволяє динамічно додавати або виключати окремі підрої без необхідності повної перебудови системи управління між роями. Це забезпечує гнучке нарощування або зменшення угруповання відповідно до задачі.

Колективна стійкість. Система здатна зберігати функціональність не лише при втраті окремих елементів рою, але й при вибутті цілих підроїв. Це досягається за рахунок алгоритмів адаптивного перерозподілу задач між елементами, що залишилися.

Розподілений інтелект. Відбувається перехід від централізованих, ієрархічних, або мережецентричних схем управління до децентралізованих механізмів, у яких окремі підрой мають автономію у виборі способів виконання поставлених задач. При цьому глобальна узгодженість досягається за рахунок обміну інформацією та локальних правил взаємодії.

Таким чином, концепція **Swarm of Swarms** розширює підхід SoS, забезпечуючи не лише інтеграцію систем, а й формування *адаптивних, стійких і масштабованих колективів автономних агентів*, що здатні ефективно діяти в умовах невідомості та динамічного середовища.

Ключові задачі кооперації у системі «Рій роїв»

Виходячи з наявності практичного досвіду застосування безпілотних систем, для концепції «рій роїв» потрібно визначити сукупність задач, що потребують вирішення для кооперації декількох роїв під час виконання місії.

Динамічна композиція системи

Однією із базових задач є формування тимчасових конфігурацій системи з наявних підроїв відповідно до вимог конкретної місії. На відміну від класичних SoS, де структура системи зазвичай визначається заздалегідь, у підході «рій роїв» необхідно забезпечити *динамічне компонування*, яке передбачає:

- швидке об'єднання підроїв у функціональні групи;
- урахування їхніх можливостей, ресурсів та обмежень;
- підтримку принципу «додай і використовуй» (plug-and-play) на рівні окремих роїв.

Це вимагає розробки алгоритмів автоматизованого формування структури системи.

Крос-доменна координація (Multi-Domain Operations)

Характерною особливістю сучасних операцій є необхідність узгодженого застосування засобів у різних середовищах: повітряному, наземному та морському. У цьому контексті виникає задача *крос-доменної координації*, яка полягає в:

- інтеграції роїв різного типу в єдину функціональну систему;
 - синхронізації їхніх дій у часі та просторі;
 - забезпеченні узгодженого досягнення цілей місії.
- Для цього потрібно вирішити наступний клас задач:
- кожен рій повинен вміти вибрати окремі елементи для комунікації з іншими роями єдиної функціональної системи (окремого «рою роїв»);
 - розподілені алгоритми формування рішення задач, що виникають локально під час виконання місії;
 - розподілені алгоритми голосування між роями для прийняття одного з рішень;
 - розподілені алгоритми виконання рішень;

— розподілені алгоритми підтвердження виконання.

Живучість процесу виконання місії

Управління системою типу «рій роїв» для досягнення цілей виконання місії потребує впровадження спеціалізованих механізмів живучості, які виходять за межі класичної відмовостійкості. Живучість забезпечується через наступні підходи [2, 3].

Функціональна надмірність і реконфігурація. Система має здатність оперативно перерозподіляти критичні функції (наприклад, ретрансляцію або розвідку) від уражених підроїв до тих, що залишилися в роботі. Наявність функціональної надмірності дозволяє не тільки розподіляти функції між елементами рою, а також розподіляти елементи одного рою між іншими роями для забезпечення живучості виконання основної місії.

Алгоритми самовідновлення. Застосовуються методи динамічного оновлення графів зв'язності. У разі втрати «рою-координатора» система ініціює процедуру вибору нового лідера на основі поточного стану ресурсів (енергія, обчислювальні можливості, зв'язність), або дозволяє корегувати локальну частину плану виконання місії шляхом кооперативної взаємодії (у тому разі, якщо «рій-координатор» відсутній).

Адаптивна поведінка в умовах деградації зв'язку. Передбачається перехід від централізованої або щільно узгодженої координації дій до автономного виконання задач на основі «наміру», що дозволяє зберігати функціональність навіть при втраті зв'язку.

Висновки

Кооперація різнотипних роїв безпілотних систем є ключовим фактором ефективності сучасних і майбутніх операцій. Запропонований багаторівневий підхід дозволяє об'єднати процеси планування, моделювання та виконання місій у єдину систему, що забезпечує узгоджене функціонування всіх елементів.

Ефективність кооперації досягається за умови стійкості системи до зовнішнього впливу, що забезпечується впровадженням механізмів живучості, та дозволяють зберігати керованість навіть за значних втрат окремих елементів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення конкретних алгоритмів і їхню експериментальну верифікацію.

1. Debie E., Kasmarik K., Garratt M. Swarm Robotics: A Survey from a Multi-Tasking Perspective. ACM Computing Surveys, 2023. DOI: 10.1145/3611652.
2. Додонов А.Г., Ландэ Д.В. Живучість інформаційних систем. Київ: Наук. думка, 2011. 256 с.
3. Додонов О.Г., Ландэ Д.В. Мережева модель структурної живучості. *Регістрація, зберігання і обробка даних*. 2021. Т. 23, № 1. С. 15–22. DOI:10.35681/1560-9189.2021.23.1.235075.
4. Bayindir L. A Review of Swarm Robotics Tasks. *Neurocomputing*. 2016.
5. Lajoie P.-Y., Beltrame G. Swarm-SLAM: Decentralized Collaborative Mapping // arXiv, 2023. <https://arxiv.org/pdf/2301.06230>

Надійшла до редакції 20.04.2026
Прийнята до друку 19.05.2026
Опублікована 17.06.2026