

РОЗВИТОК ЗАСТОСУВАННЯ ПІЛОТОВАНОЇ ТА БЕЗПІЛотної Авіації

[DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-107-116](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2026-1-10-107-116)

[УДК 004.89:355.48:623.746.9](#)

¹Шовкошитний Ігор Іванович (доктор технічних наук, старший дослідник)

<https://orcid.org/0000-0001-9245-4111>

²Василенко Ольга Анатоліївна (доктор філософії)

<https://orcid.org/0009-0002-6774-3266>

¹Національний університет оборони України, Київ, Україна

²Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 26.03.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 06.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026

КРИТЕРІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ВИБІР ЕВОЛЮЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ САМООРГАНІЗАЦІЇ ПРИРОДНИХ СИСТЕМ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОЙОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПІЛотної ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У ЗАДАЧАХ РОЗВІДКИ ТА УРАЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ПРОТИВНИКА

У статті здійснено критеріальний аналіз та обґрунтовано вибір еволюційних моделей самоорганізації природних систем, придатних для моделювання ройового застосування безпілотної літальних апаратів у задачах розвідки та ураження об'єктів противника. Проведено узагальнення математичних моделей ройової поведінки на основі біоінспірованих алгоритмів, зокрема моделей Вічека, Бойда, ройової оптимізації частинок, мурашиного та бджолиного алгоритмів, алгоритму сірих вовків, кажанів і методу штучних потенційних полів. Запропоновано систему критеріїв оцінювання математичних моделей, яка включає ступінь відповідності процесам ройового застосування безпілотної літальних апаратів, рівень математичної формалізації та обчислювальну складність. На основі проведеного аналізу визначено доцільність використання окремих моделей для опису різних етапів застосування рою безпілотної літальних апаратів, таких як узгоджений рух, уникнення перешкод, виявлення цілей, цілерозподіл та ураження об'єктів противника. Обґрунтовано перспективність застосування "гібридних моделей, що поєднують переваги різних підходів для забезпечення ефективного функціонування рою в умовах динамічної бойової обстановки. Результати дослідження можуть бути використані під час модернізації автономних бортових систем управління безпілотної літальних апаратів.

Ключові слова: самоорганізація, природні системи, кіберфізична система, безпілотної літальні апарати, ройове застосування, моделювання, математична модель, обчислювальна складність.

Вступ

Аналіз досвіду сучасних воєнних конфліктів, особливо російсько-української війни з початку широкомасштабного вторгнення, а також стрімкого еволюційного розвитку технологій у військовій сфері свідчить про інтенсивне впровадження безпілотної систем, у тому числі ударних безпілотної літальних апаратів (БпЛА), які суттєво доповнюють традиційні види озброєння, а іноді стають ефективним інструментом асиметричної відповіді противнику. Розвиток безпілотної систем нині є актуальним і довгостроковим орієнтиром, що підтверджується чинними керівними документами [1], [2]. Разом із тим, розширення номенклатури БпЛА, змісту виконуваних ними завдань, а також постійно оновлюваний досвід їх бойового застосування спонукають протиборчі сторони до пошуку, апробації, впровадження та масштабування нових способів застосування

БпЛА, що є однією з важливих умов досягнення переваги над противником. Фактично протягом останнього десятиліття спостерігається еволюція способів застосування БпЛА з переходом від виконання поодиноких завдань (розвідки, логістики, ураження) окремими БпЛА до групового застосування БпЛА, яке (з урахуванням стрімкого розвитку у світі технологій штучного інтелекту) нині трансформується у новий перспективний спосіб застосування груп БпЛА на основі принципів самоорганізації та ройової взаємодії з фактичним виключенням оператора із контуру управління або суттєвим зменшенням його участі. Зазначене підтверджується зростанням кількості інноваційних проектних рішень з елементами штучного інтелекту та ройових технологій, які нині анонсуються розробниками як в Україні, так і в усьому світі. Висока активність розробок та тестувань технологій "роїв дронів" чітко

простежується на онлайн-платформі Bavel, що об'єднує військових та українських розробників для інтеграції інноваційних оборонних технологій [3].

У результаті аналізу ройових технологій, що з'являються на платформі Bavel, виявлено, що значну увагу військові фахівці та розробники приділяють питанням: упровадження елементів штучного інтелекту для забезпечення автономності роїв БпЛА і зменшення навантаження на оператора (або його виключення); самостійного обміну інформацією між БпЛА рою, автономного планування дій рою (маршрутів польоту) з урахуванням взаємної безпеки та огинання перешкод; керування великими групами БпЛА, що діють скоординовано; інтеграції в межах одного рою наземних і повітряних роботизованих платформ; автоматичного донаведення на цілі баражуючих боєприпасів або високоточних боєприпасів для БпЛА зі скидами; тестування, масштабування та оперативного впровадження ройових технологій з метою створення переваги на полі бою завдяки автоматизації та зниженню ризиків для операторів.

Кожна із задач є складною і потребує розроблення та впровадження відповідних математичних моделей та алгоритмів, які б найбільш повно відповідали суті типових швидкоплинних процесів, що відбуваються під час застосування роїв БпЛА, а також базувались на достатньо добре формалізованому математичному апараті.

Аналіз наукових публікацій [4]–[9] свідчить про значну увагу дослідників до проблем самоорганізації роїв БпЛА та моделювання їх застосування на окремих етапах. У [7] розглянуто моделі самоорганізації однорідних БпЛА під час вирішення слабоформалізованих завдань у бортовій системі за умови, що функції планування маршруту, розподілу ролей, визначення оптимальних дій, отримання та оброблення інформації можуть вирішуватися кожним БпЛА шляхом їх самоорганізації у групі. Авторами показано проблеми та узагальнено недоліки деяких методів самоорганізації, алгоритми самоорганізації, на підставі чого зроблено акцент на розробленні нових методів і моделей самоорганізації колективів однорідних БпЛА для підвищення ефективності виконання ними слабоформалізованих задач. У [5] запропоновано варіант формалізованої логіко-часової поетапної моделі застосування рою ударних БпЛА, а також зроблено припущення про можливість опису окремих процесів на етапах їх застосування за допомогою відомих алгоритмів самоорганізації (пташиної зграї, мурашиного, бджолиного, кажанів, косяка риб, генетичного алгоритму, рою частинок, світлячків, сірих вовків, стохастичного дифузійного пошуку, бактеріального пошуку, двійкового алгоритму бабки тощо). Водночас питання щодо адаптації цих ройових алгоритмів до конкретних задач, що виникатимуть на різних етапах застосування рою розвідувально-ударних

БпЛА, віднесені авторами до перспективних досліджень. Оскільки кожен з алгоритмів не є універсальним і має переваги та недоліки, логічно застосовувати так звані "гібридні" моделі, в яких для опису окремих процесів застосування роїв БпЛА передбачено застосування математичних постановок відомих оптимізаційних задач. Наприклад, у [6] показано, що поєднання оптимізаційних та нейромережкових підходів дозволяє розв'язувати задачу цілерозподілу рою ударних БпЛА по різномірних об'єктах нестационарної групової цілі у реальному масштабі часу з урахуванням зміни складу групової цілі та рою. ударних безпілотних літальних апаратів. Проте така модель стосується лише процесу цілерозподілу БпЛА по об'єктах, але не описує процесів самоорганізації рою, як це робиться у природних біоінспірованих системах, у яких такий процес є аналогом вибору і атаки обраної ближчої або пріоритетної жертви. Отже, вибір математичної моделі для опису ройового застосування БпЛА в задачах розвідки та ураження об'єктів противника є нетривіальним завданням, яке має вирішуватися з урахуванням конкретного завдання рою, процесів його внутрішньої самоорганізації, кінцевої мети, а також придатності наявних математичних моделей для опису типових процесів застосування рою БпЛА. Ступінь придатності математичних моделей (у тому числі тих, що описують поведінку природних систем) має визначатися на підставі низки критеріїв, а найбільш придатні моделі мають відбиратися на основі їх порівняльного аналізу. Обрані моделі або їх комбінації ("гібридні" моделі) мають описувати процеси самоорганізації рою БпЛА під час реалізації низки конкретних завдань, основними з яких слід вважати безпечний вихід рою в заданий район (з огинанням наявних природних перешкод і зон активної протидії противника), виявлення / розвідку цілей та їх узгоджене ураження.

Зазначене вище зумовлює актуальність обраної теми та дозволяє сформулювати мету статті, яка полягає у здійсненні критеріального аналізу відомих моделей самоорганізації природних систем, які доцільно використовувати для моделювання ройового застосування БпЛА в задачах розвідки та ураження об'єктів противника.

Матеріали та методи

Дослідження обраної у статті тематики базується на використанні окремих положень системного підходу, загальнонаукових методів аналізу і порівняння, методів багатокритеріального оцінювання складних процесів, елементів концептуального моделювання, теорії складності обчислень.

Результати

Основна ідея статті базується на припущенні, що ройова взаємодія елементів (агентів) рою БпЛА більшою мірою притаманна живим (природним, біоінспірованим) системам, що зумовлено еволюційними чинниками формування їхньої ройової (колективної) поведінки, яка є важливою

умовою виживання будь-якої біологічної (природної) системи та виконання ними базових функцій. Це припущення дає можливість сформулювати гіпотезу про те, що математичні моделі, які описують ройову (колективну) поведінку біологічних систем (колоній), є більш прийнятними та раціональними порівняно з математичними моделями, постановки яких добре відомі у теорії дослідження операцій, але описують лише один конкретний процес, заданий цільовою функцією. Тобто приймається, що “природні моделі є більш раціональними”. З огляду на зазначене необхідно провести аналіз наявного науково-методичного апарату та обрати математичні моделі (з нині відомих), які найкраще описуватимуть групове (ройове) застосування БпЛА. Для опису процесів застосування груп (роїв) ударних БпЛА необхідно провести формалізований аналіз математичних моделей, серед яких будуть обиратись ті, що відповідають таким критеріям:

пристосованість до опису певних природних систем та процесів їхньої самоорганізації;

максимальна відповідність меті та завданням застосування рою БпЛА (серед яких основними є рух у заданий район, розвідка, наведення і ураження об'єктів групових цілей);

повнота формалізації (наявність чітких математичних постановок).

Застосування цих критеріїв дозволяє поєднати ідеї біоніки, яка передбачає застосування принципів дії живих систем і використання біологічних процесів для вирішення інженерних завдань [10], принципів кіберфізичних систем, компоненти яких взаємодіють на різних часових і просторових рівнях та можуть мати різні моделі поведінки й адаптивно взаємодіяти між собою [11], з жорсткими вимогами до математичної формалізації суто військової задачі (застосування рою БпЛА для пошуку та ураження об'єктів групових цілей) із адаптацією опису процесів у біологічних системах до алгоритмічного керування просторово розподіленими об'єктами, об'єднаними єдиною метою.

З точки зору моделювання ройового застосування БпЛА в задачах розвідки та ураження об'єктів противника, окрім традиційних математичних постановок, відомих з теорії дослідження операцій, значний інтерес становлять моделі самоорганізації складних систем, що підкріплені формалізованими математичними та алгоритмічними описами процесів, у яких складна структура або порядок виникають у системі без

прямого зовнішнього впливу, лише завдяки внутрішній взаємодії її елементів [12].

Подібні моделі описують процеси, які відбуваються в біологічних / природних системах, утворених унаслідок тривалого еволюційного розвитку. При цьому вони можуть описуватись як складні структури, що виникають із локальних взаємодій простіших елементів системи, які в теоретичних роботах часто іменуються авторами як агенти, юніти, боїди тощо.

На підставі аналізу джерел [4; 9; 13–16] у табл. 1. наведено коротку характеристику деяких математичних моделей, які за двома критеріями (математична формалізація і обчислювальна складність) умовно можуть бути придатними для опису біологічних / природних систем і які слід розглядати як можливі прототипи для опису “ройової поведінки” або “ройового застосування” БпЛА під час пошуку та ураження ними об'єктів противника в автономному режимі або за мінімальної участі оператора.

З метою можливості порівняння математичних моделей, викладених у табл. 1, введено такі критерії: ступені відповідності математичних моделей змісту процесів та меті застосування рою БпЛА, а також ступені формалізації математичних моделей – високий, середній, низький; типові процеси застосування роїв БпЛА – узгоджений рух, огинання завад (небезпечних зон, зокрема ППО, РЕБ), виявлення цілей, цілерозподіл (ЦР), ураження.

Зважаючи на доволі значну кількість подібних моделей і різний ступінь їхньої придатності для опису властивостей складної автономної кіберфізичної системи, якою можна представити рої БпЛА, основну увагу під час аналізу було зосереджено на тих математичних моделях і алгоритмах, які мають:

найкращу математичну формалізацію (що вказує на можливість їх застосування для опису процесів застосування роїв БпЛА без необхідності їх суттєвої адаптації до змісту типових задач розвідки, цілерозподілу, наведення тощо);

припустиму обчислювальну складність (ОС) і детермінованість (табл. 2), які вказуватимуть на можливість їх використання у задачах реального часу та здатність алгоритмів гарантовано завершити роботу (завдання) у заданий час (що у швидкоплинних умовах бойової обстановки є критичним для рою БпЛА).

Таблиця 1

Характеристика математичних моделей, що використовуються для опису природних / біологічних систем, процесів їх самоорганізації і групової поведінки (прототипів, придатних для опису “ройової поведінки” БпЛА)

Природна / біологічна система, математична модель, що їх описує	Ступінь відповідності змісту процесів та меті застосування рою БпЛА, можливість опису типових процесів застосування роїв БпЛА	Ступінь формалізації математичних постановок	Придатність до застосування в задачах реального часу (з точки зору ОС)
Зграї птахів / косяки риб,	<i>Середній.</i> Підходить для опису спільного польоту групи БпЛА без зіткнень під час прихованого виходу до району розвідки та	<i>Високий</i>	<i>Низька.</i> ОС базової моделі висока ($O(n^2)$ – квадратична)

Природна / біологічна система, математична модель, що їх описує	Ступінь відповідності змісту процесів та меті застосування рою БПЛА, можливість опису типових процесів застосування роїв БПЛА	Ступінь формалізації математичних постановок	Придатність до застосування в задачах реального часу (з точки зору ОС)
модель Вічека (<i>Vicsek model</i>)	спільного патрулювання. Це класична модель самоорганізації, де кожен агент вирівнює свій вектор швидкості з векторами сусідів. Опис процесу розвідки, цілерозподілу, наведення на ціль не забезпечується.		через необхідність перевірки відстані між усіма парами агентів. Середня – у разі просторового розбиття для скорочення пошуку сусідів. При цьому ОС зменшується до логарифмічної $O(n \log n)$ або лінійної $O(n)$.
Зграї птахів, модель Крейга Рейнольдса (<i>Boids</i>)	Середній . Як і попередня модель, описує спільний політ БПЛА без зіткнень, придатний для опису спільного патрулювання.	Високий	
Фізика частинок / потенційні поля, метод штучних потенційних полів (<i>Artificial Potential Fields, APF</i>)	Середній . Може бути застосовано для опису узгодженого руху групи (рою) БПЛА, огинання перешкод (ШПО, РЕБ) та кінцевого етапу атаки об'єктів. Метод забезпечує високу точність наведення БПЛА та гарантовану відсутність зіткнень. Виявлення цілей не описується , а ЦР здійснюється ситуативно.	Високий	Висока . ОС є близькою до лінійної $O(m \times n)$. Для стійкої роботи алгоритму потрібно вирішити проблему виходу з локальних мінімумів та нестабільності руху.
Вовча зграя, модель оптимізації <i>Grey Wolf Optimizer, GWO</i>	Середній . Може бути застосовано для опису дій рою різнотипних БПЛА, з розподілом функцій пошуку (виявлення) та (ураження) цілей БПЛА. Одночасне виявлення та ураження декількох цілей не забезпечується.	Високий	Середня . ОС є близькою до лінійної $O(n)$ (залежить від кількості ітерацій)
Зграї птахів / косяків риб, алгоритм ройової оптимізації частинок (<i>Particle Swarm Optimization, PSO</i>)	Середній . Може бути використано в задачах оптимізації, зокрема для планування маршрутів роїв БПЛА, координації руху та пошуку цілей. Алгоритм PSO завдяки інерційній складовій є ефективним під час динамічного пошуку цілей. Водночас модель не враховує фізичні обмеження руху агентів і може збігатися ("застрягати" в локальних мінімумах, що знижує її адекватність).	Високий	Висока . ОС лінійна $O(n)$ і залежить від кількості БПЛА у рої та розмірності простору пошуку. Тому PSO є одним із найбільш ефективних алгоритмів для задач у реальному часі.
Колонії мурах, мурашиний алгоритм оптимізації (<i>Ant colony optimization, ACO</i>)	Низький . Оптимізація маршрутів БПЛА розвідки, логістика. Дозволяє організувати маршрутизацію БПЛА з певними ресурсами або устаткуванням по вузлах (точках маршруту). Алгоритм збільшує централізацію управління і важко адаптується до задач реального часу.	Середня	Низька . ОС моделі висока ($O(n^2)$ – квадратична), адже необхідно враховувати значну кількість вузлів (цілей, точок маршруту), кількість БПЛА у рої та значну кількість ітерацій.
Бджолиний рій, алгоритм штучної бджолиної колонії (<i>Artificial Bee Colony Algorithm, ABC</i>)	Високий . Пошук цілей (джерел ресурсу), оцінка пріоритетів, розподіл ролей (розвідка, спостереження, ураження, логістика). Доцільне використання під час розподілу виявлених цілей для їх подальшого ураження.	Високий	Середня . ОС є лінійною. Легко адаптується до зміни кількості цілей, що робить її придатною для систем реального часу та для використання у бортових обчислювачах. Проте алгоритм потребує більше ітерацій для точного наведення БПЛА.
Зграя кажанів, алгоритм кажанів (<i>Bat Algorithm</i>)	Середній . Алгоритм ідеально підходить для кінцевого етапу наведення БПЛА на ціль з використанням бортових активних засобів розвідки. Ехолокаційна природа алгоритму дозволяє описувати тривимірне маневрування БПЛА.	Високий	Висока . ОС є лінійною $O(n)$. Алгоритм гнучкий та простий у реалізації, використовує контроль параметрів, який може змінювати значення параметрів у процесі ітерацій.

Таблиця 2

Порівняльна таблиця придатності математичних моделей (алгоритмів) для задач реального часу

Клас складності	Придатність	Прогнозованість	Ризики
$O(1)$ Константна	Найвища	Абсолютна	Відсутні
$O(\log n)$ Логарифмічна	Висока	Дуже висока	Мінімальні
$O(n)$ Лінійна	Висока	Висока (якщо n_{max} відоме)	Перевищення n_{max}
$O(n \log n)$ Лінійно-логарифмічна	Середня	Добра	Сплески навантаження
$O(n^k)$ Квадратична	Низька	Низька	Швидка деградація системи
$O(2^n)/O(n!)$ Експоненціальна	Відсутня	Відсутня	Повне зупинення системи

Для пояснення моделей, згаданих у табл. 1, та більш повного розуміння можливості їх застосування для опису “ройової поведінки” БПЛА наведемо їхній узагальнений опис, основні математичні вирази, якими вони задаються, а також оцінювальну характеристику їхньої обчислювальної складності.

Модель Вічека (Vicsek model) [13] – класична модель самоорганізації, що описує рух зграї птахів, у якій кожен агент вирівнює свій вектор швидкості з векторами сусідів. Два птахи опиняються поруч, синхронізують швидкості, щоб летіти в одному напрямку. Рух зграї стає більш керованим зі збільшенням щільності птахів у повітрі, оскільки кожен птах збільшує кількість сусідів, з якими координує свій рух. Модель має найвищий ступінь формалізації, дозволяє аналітично розрахувати фазовий перехід від хаотичного положення агентів до їх шикуння у “строю”: $\Theta_i(t + \Delta t) = \langle \Theta_j(t) \rangle_r + \eta_i(t)$, де $\Theta_i(t)$ – вектор швидкості i -го агента, $\langle \Theta_j(t) \rangle_r$ – середній напрямок швидкостей агентів, $\eta_i(t)$ – шумова невизначеність.

Така модель підходить для опису узгодженого руху БПЛА під час польоту до цілі та ведення розвідки. Складність базової моделі квадратична $O(n^2)$ на один часовий крок через необхідність перевірки відстані між усіма парами агентів для визначення сусідів. Час зростає пропорційно квадрату даних. Тобто якщо кількість БПЛА рою зростатиме вдвічі, час оброблення зростатиме вчетверо, що може призвести до збоїв алгоритму. Отже, модель Вічека може бути застосована для задач невеликої розмірності (малих роїв БПЛА) і лише для опису узгодженого руху під час спільного виявлення об'єктів противника.

Модель Voids [14] являє собою модель симуляції колективної поведінки, яка імітує рух птахів (“агентів” – боїдів / Voids) і базується на простих локальних правилах – розділення (утримання безпечної відстані для уникання зіткнень), вирівнювання (створює однорідність і дозволяє зграї летіти з однією швидкістю в одному усередненому напрямку), згуртування (рух до центру – кожен агент намагається триматись ближче до загального “центру мас” зграї). Агенти орієнтуються лише на сусідів, а не на всю зграю або на лідера. Математично модель описує рух окремого агента (боїда) через зміну його вектора швидкості під дією трьох основних сил (правил): розділення (p), вирівнювання (v) та згуртування (z): $\vec{v}_i(t + \Delta t) = \vec{v}_i(t) + \vec{a}_i(t)\Delta t$, $\vec{a}_i = w_p \vec{F}_p + w_v \vec{F}_v + w_z \vec{F}_z$, де \vec{a}_i – прискорення, w^* – вагові коефіцієнти.

Спрощена алгоритмічна модель руху зграї враховує: обмеження області видимості; відстань сприйняття сусідів (характеризує чутливість моделі); притягання і відштовхування: $f_{пв} = 1/d^2$.

Модель є максимально природною та реалістичною, орієнтована на траєкторну динаміку, гнучко адаптується до змін середовища, а тому

добре підходить для опису групової та ройової поведінки БПЛА (планування руху роїв) з уникненням взаємних зіткнень, узгодженим рухом і збереженням бойового порядку на маршруті польоту рою. При цьому централізований контроль рою відсутній (БПЛА рою локально взаємодіють з ближчими сусідніми БПЛА), а його поведінка є результатом самоорганізації.

Водночас зазначена модель у строгому математичному сенсі не забезпечує глобальної оптимізації, а за певних умов може призводити до хаотичних траєкторій агентів (БПЛА), що потребує введення додаткових правил.

Складність базової моделі квадратична $O(n^2)$, що може бути критичним для реального часу. Перелік правил може бути доповнений введенням додаткових факторів, таких як “пошук їжі” (виявлення цілей), обхід перешкод, “уникнення хижаків” (оминання небезпечних зон), що додатково збільшуватиме ОС моделі. Зазначене вказує на низьку придатність для опису процесів польоту великих роїв БПЛА та додаткових функцій (окрім злагодженого польоту). Але складність може бути зменшена у разі застосування евристичних алгоритмів просторового розбиття (наприклад, k -мірного дерева пошуку для упорядкування точок у просторі). Це дозволяє скоротити пошук сусідніх агентів дерева або хешування сітки / Grid hashing та зменшує ОС завдяки скороченню часу пошуку сусідів до рівня $O(n \log n)$ або до $O(n)$.

Модель ройової оптимізації частинок (Particle Swarm Optimization, PSO) базується на спостереженнях за поведінкою зграї птахів і косяків риб (запропоновано Кеннеді і Еберхартом у 1995 р.) [9]. Передбачається, що кожен агент (у нашому випадку БПЛА) рухається в багатовимірному просторі завдань, оновлюючи свою швидкість і позицію, керуючись власним досвідом і досвідом інших агентів рою.

Перевагами моделі є простота реалізації, мала кількість параметрів і здатність ефективно знаходити глобальні екстремуми у багатовимірному просторі. Рух кожної частинки визначається трьома складовими: інерційною (поточний напрямок руху), когнітивною (тяжіння до власного найкращого досвіду) та соціальною (тяжіння до найкращого рішення зграї птахів, що забезпечує збалансоване поєднання глобального пошуку рішення у всьому рої та власних (локальних) найкращих рішень кожної частинки).

Модель PSO є метаевристичним алгоритмом оптимізації і в математичній постановці відображає рівняння оновлення швидкості частинки (агента) як поєднання трьох впливів – інерції, власного та колективного досвіду та описується рівнянням: $\vec{V}_i = \omega \vec{V}_i + c_1 r_1 (p_i - x_i) + c_2 r_2 (g - x_i)$, де ω – коефіцієнт інерції; r_1, r_2 – випадкові величини, що забезпечують стохастичність пошуку; $\omega = \arg \min_{p_i} f(p_i)$ – глобальний мінімум (оптимальне значення цільової функції).

У контексті використання моделі для опису

застосування роїв БПЛА це рівняння відображає ключову ідею алгоритму: рух БПЛА описується рівняннями їхньої швидкості та положення, кожний БПЛА рухається, враховуючи власну траєкторію, а найкраще знайдене для нього рішення та найкраще рішення всього рою забезпечує колективний пошук оптимуму. При цьому самоорганізація рою забезпечується завдяки інформаційній взаємодії між БПЛА (не напряму, а через глобальні або локальні найкращі значення), пошуковий простір є абстрактним багатовимірним простором параметрів, а динаміка рою визначається математичними формулами оптимізації.

Модель PSO є простою в реалізації, має високу швидкість збіжності й може бути використана в задачах оптимізації, зокрема для планування маршрутів роїв БПЛА. Проте ця модель не враховує фізичні обмеження руху агентів і може “застрягати” в локальних мінімумах. Це може бути компенсовано завдяки застосуванню модифікацій алгоритму з адаптивною інерцією, що дозволяє рою бути швидким на етапі пошуку і точним на етапі наведення.

За критерієм ОС алгоритм PSO вважається одним із найбільш ефективних для реального часу завдяки своїй лінійності. У класичному алгоритмі кожному БПЛА потрібно враховувати лише один вектор (найкращу позицію рою). Це мінімізує навантаження на канали зв'язку, а кожен БПЛА може обчислювати свій вектор незалежно. Отже, алгоритм PSO є інструментом пошуку оптимального рішення, на відміну від моделі Voids, яка забезпечує моделювання автономних децентралізованих систем та колективного руху агентів.

Метод штучних потенційних полів (Artificial Potential Fields, APF) базується на математичному апараті класичної фізики (фізики частинок, електростатики та гравітації) і є популярними у галузі робототехніки, особливо для планування шляху агентів у реальному часі та уникнення перешкод [15]. Стосовно роювої взаємодії кожен БПЛА має розглядатись як заряджена частка, яка рухається у силовому полі, “відштовхується” від перешкод та інших БПЛА рою (точок з високим потенціалом), але “притягується” до цілей (точок з мінімальним потенціалом).

Математично модель описує вектор сили, що діє на БПЛА-агента у такому вигляді: $\vec{F}(q) = -\nabla U(q) = -\nabla U_b(q) - \nabla U_n(q)$, де $U_b(q)$ – сумарний потенціал у точці $q = (\partial U / \partial x; \partial U / \partial y)$ (вектор координат агента), що складається з компонентів відштовхування від перешкоди та притягання до цілі $U_b(q)$, $U_n(q)$. Модель вважається ідеальною для задач реального часу, оскільки її ОС є близькою до лінійної $O(m \times n)$, де m і n – відповідно кількість агентів рою та кількість перешкод, а обчислення є локальними, адже агенту достатньо даних від бортових сенсорів у заданому радіусі. Отже, така модель є ідеальною для бортових обчислювачів (контролерів), встановлених на БПЛА, за відсутності жорстких

вимог до їхньої швидкодії. Обмеження застосування моделі з математичної точки зору пов'язані із її “зависаннями” у певних варіантах взаємного розміщення завад і цілей (за умови $U_b(q) + U_n(q) = 0$) або нестабільного руху агентів під час їх проходження між декількома завадами. Подолання обмежень можливе завдяки застосуванню “гібридних” варіантів моделей, наприклад, шляхом комбінування алгоритмів APF і Voids: перший забезпечуватиме огинання завад та рух до цілі, другий підтримуватиме внутрішню структуру рою.

Модель (алгоритм) оптимізації сірих вовків (Grey Wolf Optimizer, GWO), запропонована Сейедалі Мірджалілі у 2014 році, імітує ієрархію та механізм полювання зграї сірих вовків. Алгоритм базується на суворій соціальній ієрархії популяції (зграї) вовків, які поділяються на 4 домінуючі групи: α – лідер зграї, β – помічник лідера, δ – досвідчені мисливці (вартові, розвідники), ω – решта членів зграї. β і δ підтримують α і можуть його замінити у разі потреби. Полювання зграї поділяється на три етапи: пошук жертви, оточення та напад. Математично модель полювання вовчої зграї передбачає ітераційне оновлення координат агентів (вовків) відносно трьох лідерів (α , β і певною мірою δ), які є більш досвідченими та більш повно обізнані в обстановці. $X_i(t+1) = (X_\alpha + X_\beta + X_\delta) / 3$, де X_α , X_β , X_δ – позиції вовків-лідерів.

З точки зору проблеми застосування роїв БПЛА можна припустити, що α – це БПЛА (або група), який має найстійкіший візуальний (або радіоелектронний) контакт із ціллю та визначає напрямок для атаки, β і δ – допоміжні БПЛА, які контролюють ціль з інших боків та підстраховують α у разі його можливої втрати. ω – ударні БПЛА (баражуючі боєприпаси або БПЛА зі скидами), які здійснюють маневр у районі цілі, орієнтуючись на координати, передані від α , β і δ . Позиції БПЛА лідерів X_α , X_β , X_δ визначаються з урахуванням необхідної дистанції підриву або пуску боєприпасу. Після виявлення цілі ударні БПЛА ω починають стягуватися до простору між БПЛА-лідерами, що для рою можна вважати переходом до атаки. Кожен БПЛА обчислює свій вектор руху таким чином, щоб опинитися в зоні цілі.

Зазначена модель є важливою, оскільки, на відміну від моделі Voids, вона не лише описує рух агентів, а й реалізує алгоритм колективного пошуку та оточення цілі з дотриманням властивості ієрархічності агентів. Зазначене свідчить про можливість використання моделі GWO, яка відповідає логіці процесів “розвідка” та “ураження”, для опису застосування рою різнотипних БПЛА з розподілом серед них типових функцій. Також модель може бути доцільною для варіанта розподіленого ураження об'єктів групової цілі під час дії БПЛА рою з різних напрямків. Крім того, модель GWO, порівняно з моделлю Voids для задач ураження, має низку таких переваг: стійкість до втрат, мінімізація обміну даними між агентами рою, оптимальність траєкторії агентів на шляху до цілі, що зменшує час перебування БПЛА в зоні

можливої протидії противника.

Обчислювальна складність моделі є близькою до лінійної і залежить від кількості агентів, які орієнтуються не на всіх сусідів, а лише на лідерів (α , β). Це підвищує оперативність розрахунків і збіжність їхніх результатів, що є критичним для задач реального часу, особливо якщо ціль постійно маневруватиме. Проте теоретично існує ризик передчасної збіжності моделі, що може призвести до неоптимального використання потенціалу рою, коли всі ударні БпЛА ω зосереджуватимуться на доступній, видимій для лідерів α , β і δ , а не на пріоритетній цілі (всі БпЛА злетяться в одну точку, яка не є ідеальною ціллю).

Модель мурашиної колонії (Ant colony optimization, ACO). Ідея моделі базується на тому, що мурахи здійснюють початковий пошук їжі у випадковому порядку, після знаходження повертаються в мурашник, залишаючи феромоновий слід, за яким будуть рухатись інші мурахи до джерела їжі, додатково зміцнюючи шлях феромонами. Чим сильніший феромоновий слід, залишений на шляху, тим більша кількість мурах обиратиме його для себе.

Для опису поведінки рою БпЛА цю модель можна використати обмежено, наприклад, для вибору оптимального виконавця часткової задачі – планування оптимального маршруту БпЛА рою (мурах) з необхідним устаткуванням (ресурсами), які рухаються один за одним через ключові точки або мережеві вузли. Феромони на шляху в мурашиній системі можуть бути представлені як пріоритети підзадач рою. Феромон-пріоритетність використовується як параметр, на підставі якого алгоритм обиратиме підзадачу рою, маршрут і призначатиме БпЛА-виконавців. Коли підзадача призначена виконавцю, розглядається стан її виконання, розміри робіт, а також час виконання для того, щоб вибрати необхідні БпЛА (з необхідним ресурсом), і оцінюється їхня ефективність.

Математично модель описує ймовірність того, що “мураха” (БпЛА) буде рухатись i -м шляхом $P_i = (\tau_i)^\alpha (\eta_i)^\beta / \sum ((\tau_{ik})^\alpha (\eta_{ik})^\beta)$, де τ_i – феромон (історія успіху інших БпЛА на цьому шляху), η_i – евристика, що визначає локальну привабливість шляху, α і β – відповідно величини, що визначають жадібність (успішність) та стадність (привабливість) алгоритму.

Цей алгоритм є найскладнішим з усіх розглянутих (Voids, PSO, GWO тощо) з точки зору реального часу, адже має квадратичну складність $O(n^k)$, потребує врахування значної кількості вузлів (цілей, точок маршруту), кількості БпЛА у рої та значної кількості ітерацій.

Алгоритм штучної бджолоїної колонії (Artificial bee colony algorithm, ABC) описує поведінку бджіл під час пошуку нектару: існує деяке джерело нектару, яке характеризується певною корисністю (віддаленість від вулика, концентрація, зручність видобутку). Бджоли-розвідники здійснюють обліт території і пошук джерел нектару для його збирання. Після повернення у вулик бджоли-

розвідники “вербують” вільних бджіл на виявлені джерела нектару. Механізми прийняття рішень стосовно вибору джерел досліджені недостатньо. Імовірність вербування визначається корисністю відповідного джерела нектару. Завербована бджола йде за обраною бджолою-розвідником до області з нектаром і стає, таким чином, зайнятим носієм, який після збирання нектару повертається у вулик і залишає його там. Після цього носій може: залишити “своє” джерело нектару і стати незайнятим; продовжити заготівлю нектару, не вербуючи інших бджіл; виконати вербування. Бджола обирає одну зі вказаних дій певним імовірнісним законом. Модель заснована на жорсткій ієрархії з розподілом популяції на три групи – бджоли-розвідники, робочі бджоли та бджоли-спостерігачі.

Цю модель доцільно використовувати під час розподілу виявлених цілей для подальшого ураження. У задачах, пов’язаних із роями, у яких є різні типи БпЛА або БпЛА з різними функціями, ця модель може бути корисною для розподілу ресурсів та цілевказання в умовах невизначеності. Також вона може бути використана для одночасного пошуку багатьох цілей на великій території із розподілом БпЛА-розвідників пропорційно важливості виявлених цілей, а також під час розподілу виявлених цілей для подальшого їх ураження. При цьому алгоритм забезпечує гнучкий розподіл ресурсу рою та припинення атак на ціль, що вже знищена. Недоліками алгоритму можна вважати повільну збіжність та складність урахування логіки вибору станів вільних БпЛА, що математично чітко не описується.

З точки зору обчислювальної складності модель бджолоїного рою вважається досить легкою для обчислень, що робить її придатною для систем реального часу. Час обчислень зростає пропорційно кількості БпЛА у рої, що є оптимальним для бортових обчислювачів.

Алгоритм, інспірований кажанами (Bat-Inspired, BI) [16], запропонований Янгом у 2010 році, моделює поведінку кажанів. Алгоритм поєднує в собі елементи PSO (з його властивістю інерційності) та локального пошуку здобичі з використанням фізичної моделі ультразвукової ехолокації за допомогою ефекта Доплера.

Для опису поведінки рою БпЛА застосування алгоритму є виправданим, оскільки він імітує активне зондування простору за допомогою бортової радіолокаційної станції або лазерного далекоміра, встановлених на БпЛА. Для вимірювання відстані до здобичі й перешкод, їх розрізнення кажани (БпЛА) здійснюють пошук, змінюючи потужність, частоту сигналів $[\omega^{min}, \omega^{max}]$, $\omega^{max} > \omega^{min} \geq 0$ і частоту повторення випромінюваних імпульсів. Потужність сигналу зменшується, а частота повторення імпульсів зростає з наближенням БпЛА до цілі (що може інтерпретуватись як перехід у режим точного прицілювання з більш частим оновленням даних).

У короткій математичній інтерпретації алгоритм кажанів передбачає оновлення частоти $\omega_i = \omega^{min} + (\omega^{max} - \omega^{min})\beta$, $\beta \in [0; 1]$ (кажан випадково вибирає частоту, яка визначає, наскільки сильно він має змінити напрямки та швидкість пошуку), швидкості $V_i' = V_i + \overline{\omega}(X_i - X^{**})$ (кажан змінює швидкість так, щоб рухатися в напрямку найкращого знайденого рішення X^{**} з урахуванням різної частоти) і положення $X_i' = X_i + V_i'$ так, щоб поступово наближатися до найкращого рішення X_i' .

Обчислювальна складність алгоритму є лінійною (як у GWO та PSO). Крім того, завдяки адаптивній зміні параметрів гучності та частоти алгоритм автоматично переходить від глобального пошуку до локального визначення цілі, що зменшує обчислювальні витрати на етапі фінального наведення. Зазначене свідчить про можливість використання алгоритму для опису застосування рою БпЛА у реальному часі (на етапах пошуку цілі і наведення на ціль з використанням активних бортових засобів розвідки). Водночас, алгоритм є занадто чутливим до початкових параметрів і потребує ретельного їх налаштування під динаміку польоту рою БпЛА з метою уникнення спрямування БпЛА на хибні або вже атаковані цілі (проблема застрягання у локальних мінімумах).

Обговорення

Отримані результати порівняння низки відомих математичних моделей самоорганізації природних систем підтверджують актуальність проблеми математичного опису найбільш суттєвих процесів, які характеризують застосування роїв БпЛА в умовах швидкоплинної бойової обстановки.

Кожна з моделей має свої особливості й може бути використана для опису одного або декількох процесів, які виникають на різних етапах застосування роїв БпЛА (зокрема, узгоджений рух, огинання завдань (небезпечних зон, наприклад, ППО, РЕБ), виявлення цілей, цілерозподіл, ураження), з урахуванням специфічних механізмів самоорганізації (ройової взаємодії), характерних для природних біоінспірованих систем. Зазначені моделі, у разі адаптування до завдань застосування роїв БпЛА, доцільно впроваджувати на програмному рівні в автономних системах управління роями БпЛА або використовувати їх для отримання навчальних даних для нейромережових моделей, які будуть покладені в основу інтелектуальних систем прийняття рішень на різних етапах застосування БпЛА з урахуванням поточної обстановки.

Наведений у статті перелік моделей не є вичерпним. Тому надалі потрібно приділити увагу й іншим еволюційним методам і моделям, які передбачають розвиток популяції і селекцію властивостей, необхідних для її виживання та ефективного виконання базових функцій, близьких за змістом до функцій, виконуваних роями БпЛА.

Висновки

Отже, у статті проведено критеріальний аналіз низки відомих моделей самоорганізації природних систем, які можуть бути розглянуті як прототипи

для моделювання ройового застосування БпЛА в задачах розвідки та ураження об'єктів противника. Під час аналізу перевага надавалась моделям і алгоритмам, які мають: найкращу математичну формалізацію (що вказує на можливість їх застосування для опису процесів застосування роїв БпЛА без необхідності їх суттєвої адаптації до змісту типових задач розвідки, цілерозподілу, наведення тощо) та припустиму обчислювальну складність, що свідчить про можливість їх використання у задачах реального часу, що є критичним для роїв БпЛА.

Показано, що кожна із представлених еволюційних моделей самоорганізації природних систем має свої особливості й може бути застосована для опису певних етапів застосування роїв БпЛА, а вибір конкретної моделі або групи моделей залежить від потенційного складу, завдань та кінцевої мети застосування рою БпЛА. Визначено, що для максимального врахування всіх можливих аспектів самоорганізації природних систем під час опису ройової поведінки БпЛА в задачах розвідки та ураження об'єктів противника більш доцільно перейти до "гібридних" моделей, що є предметом окремих досліджень. Зокрема, для опису процесів застосування рою різнотипних (різнофункціональних) БпЛА для виявлення та ураження динамічних об'єктів може бути розглянуто "гібридну" модель, яка поєднуватиме модель GWO на етапі пошуку цілей, модель Voids для опису узгодженого безпечного польоту та маневрування рою на маршруті до району виконання завдань, модель APF для огинання перешкод (небезпечних зон) без зіткнень і наведення на ціль. Якщо ціль є груповою та має об'єкти різних пріоритетів, "гібридна" модель може доповнюватись типовими оптимізаційними моделями цілерозподілу потенціалу рою БпЛА з пріоритетами [6].

Матеріали, представлені у статті, можуть бути корисними для науковців, які досліджують проблеми автономного управління роботизованими системами, розробників бортових систем, у яких передбачатиметься автономне управління застосуванням однорідних або різнорідних роїв розвідувально-удвних БпЛА під час виконання ними типових бойових завдань.

Список використаних джерел

- [1.] Командування ПС ЗСУ, Візія Повітряних Сил 2035. Київ, Україна: Міністерство оборони України, 2020.
- [2.] Головнокомандувач Збройних Сил України, Стратегія розвитку Повітряних Сил на період до 2035 року, наказ. Київ, Україна: МОУ, КПС ЗСУ, 2020.
- [3.] "Кластер підтримки Defense Tech розробок в Україні," Brave1. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://brave1.gov.ua/>
- [4.] А. В. Тристан та Д. І. Жуков, "Моделі самоорганізації колективу однорідних безпілотних літальних апаратів при рішенні слабоформалізованих завдань," Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, № 2(55), с.

- 32–39, 2024, <https://doi.org/10.30748/nitps.2024.55.04>.
- [5.] I. I. Шовкошитний та О. А. Василенко, "Розроблення логіко-часової моделі ройового застосування ударних безпілотної літальних апаратів з урахуванням типових способів їх групового застосування в сучасних умовах," Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ, № 3(83), с. 108–116, 2024, <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2024-3-83/108-116>.
- [6.] I. I. Шовкошитний та О. А. Василенко, "Математична модель застосування рою ударних безпілотної літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей із використанням елементів штучного інтелекту," Повітряна міць України, № 2(9), с. 48–56, 2025, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-2-9-48-56>.
- [7.] C. Gershenson, "Self-organizing systems: What, how, and why?," *nprj Complexity*, no. 10, pp. 1–8, 2025, doi: <https://doi.org/10.1038/s44260-025-00031-5>.
- [8.] F. Heylighen, "The science of self-organization and adaptivity," in *The Encyclopedia of Life Support Systems*, L. D. Kiel, Ed. Oxford, U.K.: EOLSS Publishers, 2003.
- [9.] О. А. Василенко, "Методи математичного моделювання застосування рою ударних безпілотної літальних апаратів," Повітряна міць України, № 1(8), с. 54–70, 2025, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-1-8-54-70>.
- [10.] "Біоніка," *Енциклопедія сучасної України*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://esu.com.ua/article-35330>
- [11.] *Transactions on Cyber-Physical Systems*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://surl.li/grcywu>
- [12.] Н. М. Бережна та В. С. Білокопитова, "Самоорганізація складних систем," у *Матеріали заоч. наук.-практ. інтернет-конф. Вітчизняна географічна наука: теорія і практика*, Харків, Україна, 12 листоп. 2016, с. 34–46.
- [13.] "Люди, як рідина: Що таке активна матерія та як вона пояснює фізику життя?," *Nauka.ua*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://nauka.ua/article/aktivna-materiya>
- [14.] "Swarm algorithms." [Електронний ресурс]. Доступно: <https://surl.li/hluxsa>
- [15.] І. Берізка та І. Карбовник, "Математична модель модифікованого методу штучних потенціальних полів з використанням функції Лапласа для уникнення перешкод в режимі реального часу," *Науковий журнал «Прикладні проблеми комп'ютерних наук, безпеки та математики»*, № 3, с. 12–22, 2024.
- [16.] E. V. Kuliev, A. A. Lezhebokov, and Y. A. Kravchenko, "A swarm algorithm for search engine optimization based on bat behavior modeling." [Електронний ресурс]. Доступно: <https://surl.li/xiiyvj>

¹Ihor Shovkoshtnyi (Doctor of Technical Science, Senior Research Fellow)

<https://orcid.org/0000-0001-9245-4111>

²Olha Vasylenko (PhD)

<https://orcid.org/0000-0003-2633-0131>

¹National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

CRITERIA-BASED ANALYSIS AND SELECTION OF EVOLUTIONARY MODELS OF SELF-ORGANIZATION IN NATURAL SYSTEMS FOR MODELING THE SWARM APPLICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN THE TASKS OF INTELLIGENCE AND ATTACKING ENEMY OBJECTS

The article presents a criterion-based analysis and justifies the choice of evolutionary models of self-organization of natural systems suitable for modeling the swarm application of unmanned aerial vehicles in reconnaissance and destruction of enemy objects. The generalization of mathematical models of swarm behavior based on bioinspired algorithms is carried out, in particular, the Wichek and Boyd models, particle swarm optimization, ant and bee algorithms, gray wolf and bat algorithms, and the method of artificial potential fields.

The system of criteria for evaluating mathematical models is proposed, which includes the degree of compliance with the processes of swarm application of unmanned aerial vehicles, the level of mathematical formalization, and computational complexity. Based on the analysis, the feasibility of using individual models to describe different stages of the use of a swarm of unmanned aerial vehicles, such as coordinated movement, obstacle avoidance, target detection, target assignment, and destruction of enemy objects, is determined. The prospects of using "hybrid models" that combine the advantages of different approaches to ensure the effective functioning of the swarm in a dynamic combat environment are substantiated. The results of the study can be used during the modernization of autonomous onboard control systems of unmanned aerial vehicles.

Keywords: self-organization, natural systems, cyber-physical system, unmanned aerial vehicles, swarm applications, modeling, mathematical model, computational complexity.

References

- [1.] Air Force Command of the Armed Forces of Ukraine, Air Force Vision 2035. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, 2020. (in Ukrainian)
- [2.] Commander-in-Chief of the Armed Forces of Ukraine, Air Force Development Strategy until 2035, Order. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, Air Force Command, 2020. (in Ukrainian)
- [3.] "Cluster for the support of Defense Tech developments in Ukraine," Brave1. [Online]. Available: <https://brave1.gov.ua/>
- [4.] A. V. Trystan and D. I. Zhukov, "Models of self-organization of a team of homogeneous unmanned aerial vehicles in solving semi-formalized tasks," Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine, no. 2(55), pp. 32–39, 2024, <https://doi.org/10.30748/nitps.2024.55.04>. (in Ukrainian)
- [5.] I. I. Shovkoshtnyi and O. A. Vasylenko, "Development of a logical-time model of swarm application of strike unmanned aerial vehicles taking into account typical methods of their group application in modern conditions," Collection of Scientific Works of the Center for Military Strategic Studies of the NDUU, no. 3(83), pp. 108–116, 2024, <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2024-3-83/108-116>. (in Ukrainian)
- [6.] I. I. Shovkoshtnyi and O. A. Vasylenko, "Mathematical model of the application of a swarm of strike unmanned aerial vehicles to engage non-stationary group targets using artificial intelligence elements," Air Power of Ukraine, no. 2(9), pp. 48–56, 2025, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-2-9-48-56>. (in Ukrainian)
- [7.] C. Gershenson, "Self-organizing systems: What, how, and why?," npj Complexity, no. 10, pp. 1–8, 2025, <https://doi.org/10.1038/s44260-025-00031-5>.
- [8.] F. Heylighen, "The science of self-organization and adaptivity," in The Encyclopedia of Life Support Systems, L. D. Kiel, Ed. Oxford, U.K.: EOLSS Publishers, 2003.
- [9.] O. A. Vasylenko, "Methods of mathematical modeling of the application of a swarm of strike unmanned aerial vehicles," Air Power of Ukraine, no. 1(8), pp. 54–70, 2025, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-1-8-54-70>. (in Ukrainian)
- [10.] "Bionics," Encyclopedia of Modern Ukraine. [Online]. Available: <https://esu.com.ua/article-35330>
- [11.] Transactions on Cyber-Physical Systems. [Online]. Available: <https://surl.li/qrcvww>
- [12.] N. M. Berezhna and V. S. Bilokopytova, "Self-organization of complex systems," in Proc. Internet Conf. Domestic Geographical Science: Theory and Practice, Kharkiv, Ukraine, Nov. 12, 2016, pp. 34–46. (in Ukrainian)
- [13.] "People as liquid: What is active matter and how does it explain the physics of life?," Nauka.ua. [Online]. Available: <https://nauka.ua/article/aktivna-materiya> (in Ukrainian)
- [14.] "Swarm algorithms." [Online]. Available: <https://surl.li/hluxsa>
- [15.] I. Berizka and I. Karbovnyk, "Mathematical model of the modified artificial potential fields method using the Laplace function for real-time obstacle avoidance," Applied Problems of Computer Science, Security and Mathematics, no. 3, pp. 12–22, 2024. (in Ukrainian)
- [16.] E. V. Kuliev, A. A. Lezhebokov, and Y. A. Kravchenko, "A swarm algorithm for search engine optimization based on bat behavior modeling." [Online]. Available: <https://surl.li/xiiijj>.