

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПІЛОВОАНОЇ ТА БЕЗПІЛОТНОЇ АВІАЦІЇ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-1-8-54-70

УДК 001.8:[004.8/004.942]+519.863

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

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

МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ РОЮ УДАРНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Досвід російсько-української війни свідчить про те, що одним із перспективних напрямів підвищення ефективності ведення бойових дій в сучасних умовах є перехід до групового (ройового) застосування безпілотної систем для спільного виконання розвідувальних і ударних завдань. Зважаючи на це, статтю присвячено вирішенню актуального наукового завдання, яке полягає в аналізі методів математичного моделювання застосування рою ударних безпілотної літальних апаратів (БпЛА) та визначенні можливих підходів до їх удосконалення. Актуальність статті обумовлена необхідністю визначення такого методу моделювання застосування рою ударних БпЛА, який би підвищив ефективність ураження групових цілей противника та сприяв досягненню переваги над противником з урахуванням вимог і обмежень, визначених угрупованням військ (сил) вищого рівня. Проаналізовано методи математичного моделювання застосування рою ударних БпЛА та алгоритми їх реалізації. Визначено, що задача цілерозподілу ударних БпЛА у рої не розв'язувалась комплексно. Її доцільно розв'язувати за допомогою методів штучного інтелекту, а саме нейронних мереж. Подальшими напрямками досліджень є створення більш спеціалізованих багатошарових нейронних мереж управління застосуванням рою ударних БпЛА, динамічного розподілу рою ударних БпЛА по об'єктах нестационарних групових цілей противника з урахуванням пріоритетності їхніх елементів.

Ключові слова: математичне моделювання, ударні безпілотної літальні апарати, ройові технології, нейронні мережі, ефективність ураження нестационарних групових цілей, управління застосуванням рою, штучний інтелект, російсько-українська війна.

Вступ

Упровадження ройових принципів застосування безпілотної роботизованих платформ розглядається як один із основних шляхів розвитку сучасних і перспективних озброєнь, а також гарантування технологічної та військово-технічної переваги над противником [1]. З огляду на це в багатьох країнах проводяться інтенсивні дослідження, спрямовані на те, щоб досягти потрібного ефекту (розвідки, ураження, доставляння вантажів тощо) завдяки використанню узгоджених алгоритмів дій безпілотної літальних апаратів (БпЛА) у групі (рою) [2–6]. Для України, на території якої фактично відбувається війна нового типу з випробуванням усіх новітніх технологій (зокрема в галузі безпілотної авіації та роботизованих комплексів) [7–10], подібні питання є, безумовно, актуальними.

Увага фахівців багатьох країн зосереджується на впровадженні у військовій сфері технологій ройового застосування засобів розвідки та ураження, зокрема ройового застосування ударних БпЛА, яке, на думку фахівців [3–6; 11], сприятиме раціональному розподілу БпЛА по цілях, адаптивному реагуванню на зміну ситуації, зменшенню навантаження на оператора, а також

підвищенню ефективності застосування БпЛА під час виконання ними завдань розвідки, ураження, логістики тощо. Упровадження ройових технологій неможливе без розроблення відповідних методологічних основ і, зокрема, математичних моделей, що описують процеси застосування роїв ударних БпЛА.

Незважаючи на доволі розвинений методичний апарат, яким описуються процеси функціонування безпілотної систем, дослідженню питань математичного моделювання застосування рою ударних БпЛА присвячено незначну кількість наукових праць; наявні праці мають або занадто вузьку спрямованість, або в доволі узагальненому вигляді описують процеси взаємодії абстрактних об'єктів у групі (рою). Здебільшого це прості математичні (розрахункові) моделі, що описують окремі процеси, які можна (з певними застереженнями) трактувати як процеси застосування рою ударних БпЛА. На жаль, поки що немає наукових праць, у яких проблеми застосування рою ударних БпЛА розглядалися б комплексно.

Зважаючи на зазначене, метою статті є аналіз методів математичного моделювання застосування рою ударних БпЛА.

Матеріали та методи

Дослідження обраної у статті тематики базується на загальнонаукових методах (аналізу, порівняння, аналогій), окремих положеннях системного підходу до розв'язання складних завдань, окремих положеннях теорій імовірності, надійності систем та методах штучного інтелекту.

Результати

Математичне моделювання застосування рою ударних БпЛА може бути проведено за допомогою різних математичних моделей.

Вибір математичної моделі визначається особливостями конкретної поставленої задачі.

Зокрема, аналітичні стохастичні моделі дозволяють знайти середні характеристики функціонування рою ударних БпЛА, тобто дають можливість отримати більш повні характеристики процесів. Крім того, на основі ймовірнісних аналітичних моделей можна досліджувати граничні стани системи за заданих значень параметрів [12–14].

Аналіз математичних моделей, які було використано для математичного моделювання застосування рою ударних БпЛА, показав, по-перше, що більш розробленими на цей час є детерміновані, ніж стохастичні моделі.

По-друге, продемонстровано, які методи для моделювання застосування роїв ударних БпЛА нині використовуються, а саме: методи математичного моделювання узгодженого руху групи БпЛА; математичного моделювання самоорганізації рою БпЛА; математичного моделювання управління роєм БпЛА; математичного моделювання розпізнавання цілей; математичного моделювання цілерозподілу у складі рою БпЛА.

По-третє, задача цілерозподілу ударних БпЛА у рої не розв'язувалась комплексно із застосуванням методів штучного інтелекту, а саме нейронних

мереж.

По-четверте, показано, що задачу цілерозподілу ударних БпЛА по об'єктах групової цілі з урахуванням їхньої пріоритетності може бути розв'язано не класичним способом, тобто розв'язанням оптимізаційної задачі для цілерозподілу ударних БпЛА, а за допомогою методів штучного інтелекту для цілерозподілу.

Для моделювання із застосуванням штучного інтелекту використовують різні підходи, зокрема стохастичні, логіко-лінгвістичні методи, моделі Маркова, лінійне цілочислове програмування, теорію розпізнавання образів, нейронні мережі. Також застосовують швидкий метод розповсюдження обмежень, евристичні методи.

Під евристичними алгоритмами зазвичай розуміють способи ухвалення рішень, подібні до того, як це робить людина, побудовані на інтуїтивних міркуваннях, що спираються на попередній досвід. Використання евристичних алгоритмів поширене в задачах розпізнавання різної природи. Для багатьох практичних проблем ці алгоритми є єдиним можливим шляхом отримання задовільного рішення в реальному часі. Значна частина прикладних задач штучного інтелекту в процесі їхнього розв'язання потребують перебору варіантів, що вказує на їхню комбінаторну природу. Тому ці задачі зводяться до задач комбінаторної оптимізації. Відомі методи моделювання не завжди пояснюють перебірну природу задач штучного інтелекту.

Для кращого розуміння наведемо основні існуючі методи математичного моделювання застосування рою ударних безпілотної літальних апаратів. Насамперед розглянемо методи та математичні моделі, придатні для опису узгодженого руху групи БпЛА (табл. 1) та процесу самоорганізації роїв БпЛА (табл. 2).

Таблиця 1

Математичні методи та моделі, придатні для моделювання застосування рою ударних безпілотної літальних апаратів

№ з/п	Математичні методи	Моделі	Показники (Опис)
1	2	3	4
1.	Методи та математичні моделі, придатні для опису узгодженого руху групи БпЛА		
1.1	Метод PSO (Пташина зграя) (Крег Рейнольдс) [15, 16]	Алгоритмічна модель руху зграї враховує: обмеження області видимості; відстань сприйняття сусідів (чутливість): $S \propto \frac{1}{e^d}$; притягання і відштовхування: $f_{ne} \propto \frac{1}{d^2}$.	$S \propto \frac{1}{e^d}$ – відстань сприйняття сусідів (чутливість); $f_{ne} \propto \frac{1}{d^2}$ – притягання і відштовхування. Найпростіша модель для проведення оцінювання ефективності поведінки “рою” БпЛА. Використовує метаевристичний метод оптимізації PSO, що моделює поведінку пташиної зграї Рейнольдса. Модель може стати основою для побудови бойових порядків розгалуженої мережі, утвореної великою групою різномірних БпЛА.
1.2	Метод релаксації Ллойда [16]	Модель для порівняння використовує загальну для всієї групи зважену матрицю інцидентності. Під час аналізу інформаційної зв'язності вважають сусідами й утворювати інформаційні канали між тими БпЛА, на яких будується граф триангуляції Делоне (двоїстий до діаграми Вороного). Для оптимізації випадкового графа (у загальному випадку не зв'язаного) застосовано алгоритм релаксації Ллойда.	Для кількості БпЛА $\ V\ =16$, району площею $a*b=16*16$ і $\sqrt{\frac{a*b}{\ V\ }} \leq r_{adj} = 4,5$ радіуса зв'язності. Рівномірність розподілу визначається за відносним відхиленням площ комірок Вороного від середнього та забезпеченням критерію зв'язності.

1	2	3	4
1.3	Удосконалена модель узгодженого руху автономної групи БпЛА [16]	У загальному вигляді модель може бути поданою у векторному вигляді: $\vec{V} = \vec{V}_{aim} + \vec{V}_{coh} + \vec{V}_{rep} + \vec{V}_{AAD},$ де $\vec{V}$ – результуючий вектор швидкості БпЛА i ; $\vec{V}_{aim}, \vec{V}_{coh}$ – вектори швидкості наближення до цілі та сусідів відповідно; $\vec{V}_{rep}, \vec{V}_{AAD}$ – вектори швидкості відштовхування від сусідів та перешкод. Розроблена модель узгодженого руху автономної групи БпЛА надає можливість дослідити рух групи БпЛА за умови підтримання інформаційної зв'язності в кожен момент часу з урахуванням протидії противника. Вектор швидкості i -го БпЛА: $\vec{V} = \vec{V}_{aim} + \vec{V}_{coh} + \vec{V}_{rep} + \vec{V}_{AAD}$ x_i, x_j – координати взаємодіючих БпЛА; n_{UAV} – загальна кількість БпЛА; n_{AAD} – загальна кількість засобів ППО.	Наближення до цілі: $\vec{V}_{aim} = \begin{cases} \frac{\partial x_i(t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_i(t)} k_{aim1} \sqrt{k_{aim2} + (x_i(t) - x_{aim})^2 + (z_i(t) - z_{aim})^2} \\ \frac{\partial z_i(t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z_i(t)} k_{aim1} \sqrt{k_{aim2} + (x_i(t) - x_{aim})^2 + (z_i(t) - z_{aim})^2} \end{cases}$ $k_{aim1}, k_{aim2}, k_{coh}, k_{rep}, k_{ac}, k_{ar}, k_{AAD}, P_{wcoh}, P_{wrep}, P_{wAAD}$ – параметри моделі. Наближення до сусідів: $\vec{V}_{coh} = \begin{cases} \frac{dx_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^{n_{UAV}} \frac{\partial}{\partial x_i} F_{coh}(X_i, X_j) \\ \frac{dz_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^{n_{UAV}} \frac{\partial}{\partial z_i} F_{coh}(X_i, X_j) \end{cases}$ Функція інформаційної зв'язності (притягання – відштовхування): $\Phi = F_{coh} - F_{rep}.$ Критерій інформаційної зв'язності $K_{inf} \geq 2$ $K_{inf} = \min \{ \chi(G), \lambda(G) \},$ $\chi(G) \leq \lambda(G) \leq \min_{v_i \in V} \{ \deg(v_i) \}$ $\chi(G)$ – число реберної зв'язності; $\lambda(G)$ – число вершинної зв'язності.
1.4	Метод організації роботи групи безпілотної літальних апаратів [17]	Математична модель відштовхування БпЛА (алгоритму уникнення зіткнень БпЛА): $F_y = \begin{cases} \frac{P_l}{l^2}, \text{ якщо } l < l_d \\ 0, \text{ якщо } l = l_d \end{cases}$ Модель описує групу БпЛА, яка здатна до самоорганізації, що значно підвищує ефективність використання БпЛА порівняно з використанням поодиноких БпЛА. Здійснює перерахунок траєкторії БпЛА за алгоритмом уникнення зіткнення.	l – мінімальна дозволена відстань між БпЛА; l_d – відстань до БпЛА, який передає сигнал. Використання базових алгоритмів самоорганізації дозволяє забезпечити виконання спільних узгоджених дій групою (роєм) БпЛА. Модель враховує взаємодію та поведінкові процеси за теорією ройового інтелекту, що дає змогу вирішити проблеми, пов'язані з передаванням інформації на великі відстані та обробленням великих обсягів інформації. Запропоновано використати алгоритм уникнення зіткнень, який дає змогу попередити зіткнення між БпЛА до здійснення самоорганізації рою, коли розташування БпЛА може бути хаотичним.
1.5	Метод оптимального кооперативного планування шляху для групи БпЛА на основі теорії ігор [18]	Модель оптимального кооперативного планування шляху для групи БпЛА на основі теорії ігор (Game theory-based particle swarm optimization, GPSO): $J(X_n) = \sum_{i=1}^n \omega_i J_i(X_n).$ Складається з алгоритмів кооперативного планування траєкторії для декількох БпЛА з використанням оптимізації рою частинок.	X_n – шлях групи БпЛА; $J(X_n)$ – вартість, що відповідає обмеженням i ; $J_i(X_n)$ – функція вартості, де $i = 1, 2, \dots, \eta$; η – кількість обмежень; ω_{pi} – вагові коефіцієнти. Шлях групи БпЛА визначається набором K -вузлів, представлених маршрутними точками: $P_n(k) = (x_n(k), y_n(k), z_n(k))^T, k = 1, 2, \dots, K$ Метод заснований на теорії ігор і алгоритмах оптимізації рою частинок для проблеми спільного планування траєкторії кількох БпЛА, що рухаються в бажаній геометричній конфігурації. Проблема спільного планування шляху БпЛА вирішується шляхом знаходження рівноваги гри Штакельберга – Неша.
1.6	Метод моделювання поведінки БпЛА на основі нейронних мереж [19]	Модель поведінки БпЛА на основі нейронних мереж. Використовується модель нейронної мережі Хопфілда для планування маршрутів БпЛА. У моделі враховано функцію вартості для кожного БпЛА в рої.	Розроблено застосунок для моделювання руху БпЛА за визначеними координатами заданої траєкторії (у програмному середовищі MATLAB). У задачі кооперативного планування маршрутів метою є пошук оптимальних шляхів для всіх БпЛА з початкових точок до цільових місць, виконуючи всі вимоги, що накладаються обмеженнями на форму формації, довжину шляху, уникнення загроз і обмеження на кут розвороту.
1.7	Метод автоматизовано-го планування маршруту польоту безпілотної літального апарату для пошуку динамічного об'єкта [20]	Передбачає пошук замкнутого, або розімкнутого маршруту, що зв'язує всі або частину заданих маршрутних точок. Траса не повинна мати розривів. Як показник ефективності (E_s) маршруту польоту БпЛА для пошуку динамічного об'єкта можна використовувати оцінку зваженого математичного сподівання числа виявлень динамічного об'єкта на s -му маршруті польоту БпЛА: $E_s = \sum_{n=1}^N (U_n \times \sum_k \Delta P_{k,m-n}),$ де U_n – важливість об'єкта дії, до якого веде маршрут руху динамічного об'єкта і на якому знаходиться даний об'єкт дії. Важливість обирається на інтервалі $[0,1]$ за приналежністю ділянці моніторингу до конкретного маршруту руху динамічного об'єкта. Передбачає використання нейронних мереж (мережі Хопфілда).	Показники та критерії поділяються на дві взаємопов'язані групи: а) ефективність досягнення мети динамічним об'єктом; б) ефективність виконання місії БпЛА з пошуку динамічного об'єкта. Метод враховує невизначеність в діях протилежної сторони, формує варіанти прогнозу руху, оцінює динамічні характеристики об'єкта на кожному з варіантів можливих маршрутів його руху, що дозволяє знизити невизначеність інформації про ці маршрути і сформувати раціональний маршрут моніторингу об'єктів спостереження. Для множини можливих маршрутів критерієм вибору кращого для виявлення об'єкта пошуку є вимога максимізації показника: $E = \max_s E_s.$ Введені показники і критерії оцінювання ефективності пошуку динамічних об'єктів з використанням БпЛА дозволяють отримати значення порівняльної ефективності для маршрутів польоту БпЛА з виконання завдань моніторингу та пошуку.

Зазначені у табл. 2 математичні методи демонструють різноманітність підходів до моделювання поведінки рою БПЛА – від простих евристичних до складних адаптивних моделей. Найбільш перспективними є ті моделі, що поєднують можливість самоорганізації,

підтримання інформаційної зв'язності та адаптації до зовнішніх загроз. Для моделювання складних сценаріїв застосування рою БПЛА доцільно комбінувати різні підходи (моделі), що дозволить підвищити гнучкість та ефективність застосування рою БПЛА в реальних умовах.

Таблиця 2

Методи та математичні моделі, придатні для опису процесу самоорганізації роїв БПЛА

№ з/п	Математичні методи	Моделі	Показники (Опис)
1	2	3	4
2.	Методи та математичні моделі, придатні для опису процесу самоорганізації роїв БПЛА		
2.1	Модель Ван Лоуна [23, 24, 25]	$\begin{cases} x_i'(t) = \frac{x_{i+1}(t) + x_i(t)}{2} - x_i(t) \\ x_n'(t) = \frac{x_n(t) + x_1(t)}{2} - x_n(t) \\ z_i'(t) = \frac{z_{i+1}(t) + z_i(t)}{2} - z_i(t) \\ z_n'(t) = \frac{z_n(t) + z_1(t)}{2} - z_n(t) \end{cases}, i = \overline{1, n-1}$ 	n – площина; i – випадкова точка, яка має інформацію лише про власні координати та координати точки $i+1$; остання точка з номером n має координати точки 1. Умова: координати центру групи знаходяться в початку координат. Траєкторії точок сходяться в еліпс і рівномірно розподіляються по ньому.
2.2	Модель Я. І. Петрикевича [23, 24, 25]	$\begin{cases} x_1(t) \equiv x_1(0), x_n(t) \equiv x_n(0) \\ x_i'(t) = \frac{x_{i+1}(t) + x_{i-1}(t)}{2} - x_i(t) \\ z_1(t) \equiv z_1(0), z_n(t) \equiv z_n(0) \\ z_i'(t) = \frac{z_{i+1}(t) + z_{i-1}(t)}{2} - z_i(t) \end{cases}, i = \overline{2, n-1}$ 	Умова: точка має інформацію про дві інші точки й прагне зайняти місце між ними. Точки рівномірно розподіляються не по еліпсу, а по відрітку, кінці якого можуть бути або фіксованими, або рухатись по визначених траєкторіях.
2.3	Модель В. А. Савченко [23, 24, 25]	Модель враховує обмеження на максимальну відстань між точками, що забезпечує зв'язність ланцюга “агентів-ретрансляторів”: $\dot{z}_i = u_i = u_i^{36} + u_i^{ypr}$ 	Модель забезпечує оптимальні траєкторії для точок, що утворюють ланцюг у напрямку заданої цілі.
2.4	Модель Лотки – Вольтерри [23, 24, 25]	Модель описує взаємодію двох видів – популяції хижаків і популяції жертв. $\begin{cases} \frac{dX}{dt} = \gamma X - \chi XY \\ \frac{dY}{dt} = -\delta Y + \mu XY \end{cases}$ $X = X(t)$ – кількість жертв, $Y = Y(t)$ – кількість хижаків. 	Припущення: 1) за відсутності хижаків жертви розмножуються необмежено згідно з рівнянням Мальтуса: $\frac{dX}{dt} = \gamma X$; 2) хижаки за відсутності жертв вимирають: $\frac{dY}{dt} = -\delta Y$; 3) доданки, пропорційні добутку XY, розглядаються як перетворення енергії одного джерела на енергію іншого (ефект впливу популяції хижаків на жертв: результат їхньої зустрічі полягає в зменшенні швидкості приросту dX/dt чисельності жертв на величину XY, пропорційну чисельності хижаків).
2.5	Метод ройового інтелекту розв'язання прикладних задач в геоінформаційних системах [26]	Узагальнену модель ройового інтелекту представлено короткем: $ESI = \langle S, X, A, N, P, I, O \rangle$. Для визначення параметрів ройових алгоритмів використано метод Q-Learning. Передбачає використання алгоритму навчання з підкріпленням.	S – множина агентів (особин), тобто рій (популяція); X – множина станів агентів рою; A – алгоритм створення множини станів агентів рою; N – околі (сусідство) агентів рою; P – множина вільних параметрів алгоритму A (евристичні коефіцієнти); $I = \{I_1, I_{oc}\}$; I_1 – вхід системи, на який подається цільова функція, обмеження; I_{oc} – вхід для зворотного зв'язку; $O = \{O_1, O_{oc}\}$; O_1 – вихід (найкращий знайдений розв'язок задачі); O_{oc} – вихід для зворотного зв'язку.

Крім зазначених у табл. 2, до ройових методів також належать: метод мурашиної колонії; метод бджолиного рою; еволюційні методи; алгоритм, інспірований кажанами (Bat-Inspired, BI); алгоритм мавпячого пошуку (М-алгоритм); алгоритм косяка риб; алгоритм світлячків; алгоритм бур'янистої

оптимізації (Invasive Weed Optimization, IWO); зозулиний пошук; генетичний алгоритм тощо [26].

Математичні моделі, придатні для опису процесу самоорганізації ройів БпЛА забезпечують формування впорядкованої структури рою БпЛА без централізованого керування, ґрунтуючись на локальній інформації окремих агентів.

Таблиця 3

Методи та математичні моделі, придатні для опису процесів управління роями БпЛА

№ з/п	Математичні методи	Моделі	Показники (Опис)
1	2	3	4
3	Методи та математичні моделі, придатні для опису процесів управління роями БпЛА		
3.1	Модель управління групою поведінкою БпЛА [27]	Модель описує управління різнорідними багатоконтактними групами БпЛА у слабко визначених цільових діях: $E_{\max} = Y(B(p, S, E, t)) \rightarrow \max$. Запропоновано формування різних фаз виконання дій управління групою БпЛА на прикладі вибору різних цілей для БпЛА групи.	$E_{\max}$ – функціонал, який визначає узагальнену результативність дій групи БпЛА за сукупністю об'єктів, що залежить від Q; Q – розподіл задач між БпЛА; t – час, необхідний для відслідковування та/або ураження i-м БпЛА j-ї цілі та/або об'єкта. Вимагає застосування технологій штучного інтелекту.
3.2	Модель мультиагентного управління [28]	Основа – концепція застосування групи БпЛА як мультиагентної системи (МАС). Кожен БпЛА мультиагентної системи має бути обладнаний бортовою системою управління, яка реалізує алгоритми взаємодії інтелектуальних агентів у МАС і наділена методами пошуку й ухвалення рішення для виживання БпЛА в навколишньому середовищі під час виконання завдання. Локально взаємодіючи, інтелектуальні агенти створюють так званий колективний (роевий) інтелект, який здатний до самоорганізації і складної поведінки, навіть якщо стратегія поведінки кожного агента досить проста.	Застосування МАС має вирішити проблему стрімкого зростання складності управління кожним БпЛА у групі у разі збільшення їхньої кількості. Принцип управління “один оператор – один БпЛА” трансформується в “один оператор – МАС”, що дозволяє операторові управляти всією групою як єдиним цілим. Для ефективного функціонування “рою” кожен його член має бути наділений такими функціями: уміти визначати своє місцеположення; підтримувати контакт із сусідами і реагувати на їх втрату; підтримувати ієрархію агентів, вживати заходів у разі втрати агентів-лідерів; здійснювати оцінювання виконання завдання; визначати найкращу поведінку.
3.3	Модель розподілених алгоритмів управління роєм роботів для проходження лабіринту [29]	$\begin{cases} a\lambda \rightarrow \lambda A \\ A \rightarrow a^R, \\ a\omega \rightarrow a^L w \end{cases}$ Перше правило відповідає переміщенню робота на вільну позицію, друге – повороту направо, третє – повороту наліво за умови, що перед роботом знаходиться стінка.	λ – символ, яким відмічено вільні місця у прямокутному полі (лабіринті); w – символ, яким відмічено стінки лабіринту. Побудова алгоритмів управління роєм роботів розглядається на прикладі розв'язання задачі обходу лабіринту (з метою виходу з нього). Модель побудована на принципах ройового інтелекту. Інструмент розроблення алгоритмів – стохастичні блокові клітинні автомати з марковськими системами правил. Застосовуються марковські системи.
3.4	Метод групового керування автономними БпЛА літакового типу на основі децентралізованої архітектури взаємодії за схемою консенсусу та неоднорідного векторного поля проходження шляху полягає в тому, що, на відміну від відомих стратегій консенсусу лінійних моделей, враховується нелінійна структура системи “автопілот БпЛА” і, на відміну від наявних підходів “лідер-ведені”, у цьому методі відсутній апарат – “лідер-ведені”. Розроблено децентралізовані алгоритми управління групами БпЛА на основі методу векторного поля.	Запропонований метод децентралізованого управління групою автономних БпЛА літакового типу на основі децентралізованої архітектури взаємодії за схемою консенсусу та неоднорідного векторного поля проходження шляху полягає в тому, що, на відміну від відомих стратегій консенсусу лінійних моделей, враховується нелінійна структура системи “автопілот БпЛА” і, на відміну від наявних підходів “лідер-ведені”, у цьому методі відсутній апарат – “лідер-ведені”. Розроблено децентралізовані алгоритми управління групами БпЛА на основі методу векторного поля.	$\hat{e}^0$ – вектор кутових помилок; $\hat{d}$ – вектор помилок відстаней; χ^0 – вектор управління курсовими кутами для групи БпЛА; $V_{\min}$ – мінімальна швидкість БпЛА; $V_{\max}$ – мінімальна швидкість БпЛА; χ^c – курсовий кут. Недоліки методу “ведучий-ведені”: відсутність зворотного зв'язку від ведених апаратів, а також централізованість системи управління, яка полягає в тому, що вихід з ладу БпЛА-лідера веде до втрати форми групи БпЛА. Переваги: простота реалізації. Математичну модель описано в MATLAB/Simulink.
3.5	Методика оцінювання ефективності автономного управління в групі БпЛА військового призначення на основі мережових інформаційних технологій [16, 25, 33]	Математична постановка: $E = f(W, N_{\text{ц}}, N_{\text{БпЛА}}, T_{\text{ПР}}, I, C_{\text{СГУ}}) \rightarrow \max$ $W = N_{\text{ц}}^{\text{ПР}} / N_{\text{ц}} \rightarrow \max$ – якість ухвалення рішень; $N_{\text{ц}}^{\text{ПР}}$ – кількість цілей, по яких ухвалене рішення (кількість розв'язаних задач); $N_{\text{ц}}$ – кількість цілей в районі відповідальності групи БпЛА; $N_{\text{БпЛА}}$; $T_{\text{ПР}} \leq T_{\text{ПР}}^{\text{доп}}$ – час ухвалення рішення на розв'язання задач і формування раціональної топології групи БпЛА не більший за допустимий; $C_{\text{СГУ}} \leq C_{\text{СГУ}}^{\text{доп}}$ – вартість системи групового управління не більша за допустиму; $I \leq I^{\text{доп}}$ – інформація, що циркулює між групою і наземним пунктом управління. Критерій оцінювання ефективності – кількість управляючої інформації (повідомлень за цикл управління).	Модель описує інформаційні процеси, що відбуваються у групі БпЛА; отримано залежності часу ухвалення рішення від кількості БпЛА (об'єктів управління) та кількості групових задач (кількості цілей) для централізованого способу управління та автономного управління. Методика дозволяє реалізувати схему децентралізованого автономного управління групою БпЛА. За рахунок децентралізованого формування колективних задач при автономному управлінні вирішується в 3,25 разів більше задач порівняно з їх послідовним формуванням при централізованому управлінні.

1	2	3	4
3.6	Метод віртуальних структур [34]	У цьому методі централізоване управління групою БпЛА виконується у три етапи: 1) розраховується бажана динаміка віртуальної структури; 2) стани віртуальної структури трансформуються у відповідні стани кожного агента; 3) закони управління для кожного з агентів реалізуються для відстеження траєкторій відповідно до попередніх кроків.	Згідно з цим підходом агент має точно розрахувати свій рух для переміщення в задані вершини віртуальної структури (точно обчислити координати роботів у деякій глобальній системі координат), що рухається обраним чином. Оскільки цей підхід передбачає тільки отримання форми строю у вигляді багатокутників, було запропоновано модифікацію, яка називається "метод віртуальних лідерів", де група віртуальних агентів задає як рух реальних апаратів, так і саму форму строю. Ця модифікація є більш гнучкою стратегією управління, проте складність системи зростає зі зростанням кількості реальних апаратів (а отже, і віртуальних лідерів) у групі. Передбачає централізоване управління групою БпЛА.
3.7	Метод управління групою БпЛА на основі ройового інтелекту [35]	У методі запропоновано для управління групою малорозмірних БпЛА використовувати ройовий підхід. Під завданням $p_b \in P$, що стоїть перед роем, розумитимемо досягнення роем такого стану: $S_k^b = \langle S_{1k}^b, S_{2k}^b, \dots, S_{Nk}^b \rangle$, де N – кількість мікророботів у ройі, $S_{ik}^b (i = 1, 2, \dots, N)$ – цільовий стан мікроробота r_i , необхідний для розв'язання задачі p_b , за якого досягається мінімум деякого функціонала $Y = F_b(S_1, S_2, \dots, S_N)$.	Залежно від характеру інформаційного обміну в ройі роботів можливі два сценарії: 1. Робот, який виявив ціль, повідомляє сусіднім роботам координати цілі, ті передають цю інформацію "по ланцюжку" своїм сусідам, і дуже швидко всі роботи ройу мають інформацію про місцезнаходження цілі та можуть рухатися в її напрямку. 2. Робот, який виявив ціль, не може повідомити її координати іншим роботам ройу. Під час моделювання розв'язували задачу дотримання дистанцій, баражування в заданому напрямку в безвітряну погоду і з вітром, слідування за "ведучим" із числа учасників ройу, пошук і виявлення цілей, проходження до цілей. У разі виявлення декількох цілей рій розділяється на підгрупи, кожна з яких слідує до однієї з цілей.
3.8	Математична модель СППР для керування БпЛА [36]	Динамічна модель СППР для дистанційного керування БпЛА, задана лінійним неоднорідним диференціальним рівнянням вигляду: $\sum_{j=0}^q a_{q-j}(t) \frac{d^j y}{dt^j} = f(t),$ $y^{(i)}(0) = y_0^{(i)}, i = 0, q-1$	Розроблено методику розв'язання динамічних моделей СППР для дистанційного керування БпЛА, яка базується на використанні варіаційно-градієнтних методів. Методика дає можливість оптимально реалізувати методи варіаційно-градієнтного типу в процесі автоматизації дистанційного керування БпЛА.
3.9	Модель інтелектуального керування з використанням асоціативної пам'яті [37]	Керування об'єктом здійснюється за його асоціативною моделлю (у формі взаємно однозначних відображень, які мають зберігатися у пам'яті автомата): $U[i] \Leftrightarrow y[i], i = 1, \dots, P$ U_n – вхідний сигнал; y_{n+1} – реакція об'єкта на вхідний сигнал.	Може бути реалізованою у разі автоматичного керування багатозв'язним статичним об'єктом та описується нелінійним рівнянням: $\vec{y}_n = F(\vec{u}_{n-1}) + \vec{v}_n$, де $\vec{u}_n \in R^N$, $\vec{y}_n \in R^N$ – вектори управління і вихідних змінних відповідно; $\vec{v}_n \in R^N$ – вектор неконтрольованих збурень, що задовольняють деяким обмеженням; F – нелінійний оператор.
3.10	Метод інтелектуального керування на базі обернених нейронних мереж [37]	Використовується обернена нейронна мережа. Закон керування набуває вигляду: $U_n = U_{n-1} + NN[\omega, y^0] - NN[\omega, y_n]$, де ω_n – вектор, що має оновлюватися в кожний n -й момент часу на основі того чи іншого алгоритму навчання (зокрема алгоритму для адаптивної ідентифікації нелінійно параметризованого динамічного об'єкта).	$\tilde{U} = NN[\omega, \tilde{y}]$ – універсальна вектор-функція, що реалізується штучною нейронною мережею; ω – вектор ваг нейронної мережі.
3.11	Модель управління роем динамічних об'єктів на базі мультиагентного підходу [38]	Консенсусне мультиагентне управління задається таким співвідношенням: $U_t^i = \alpha \sum_{j \in D_t^i} b_t^{i,j} (y_t^{i,j} - y_t^{i,i}),$ де α – величина кроку протоколу управління. Динаміка зміни напрямку руху об'єкта описується різницевою рівнянням: $x_{t+1}^i = x_t^i + f(U_t^i, x_t^i).$ U_t^i – управління; t – час; $y_t^{i,j}$ – потенціал маршруту сусідніх агентів; $\omega_t^{i,j}$ – перешкоди (шум); D – множина динамічних об'єктів (агентів) $d_i (i = 1, \dots, n)$, спільна взаємодія яких забезпечує розв'язання деякої множини завдань $P = P_1, \dots, P_m$ (рій агентів); r – відстань до найближчих сусідів. Рух кожного агента d_i характеризується напрямком x_i і значенням потенціалу обраного шляху q_i . Потенційна функція характеризує можливість досягнення цілі S у разі збереження руху в напрямку x_t^i . Наприклад, за відомого напрямку на ціль S_t^i для агента i в момент часу t можна покласти $q_t^i = q_t^i(x_t^i) = \langle x_t^i, S_t^i \rangle$.	Кожен агент під час остаточного визначення напрямку руху намагається вибрати маршрут так, щоб уникнути зіткнень. Наприклад, можна задати функцію $\varphi \dot{t}$, яка відхиляє рух у випадковому напрямку в тому разі, якщо агент i виявляє перешкоду в X_t^i на відстані ближче r . Застосовано технологію мультиагентних систем до задачі управління роем. Модель описує особливості ройового управління та протокол локального голосування (для досягнення консенсусу в мережі агентів), за допомогою якого будується стратегія адаптивного управління в умовах невизначеностей, а також представлено алгоритм управління роем динамічних об'єктів на основі досягнення консенсусу. Переваги моделі: дає можливість застосування принципів самоорганізації для управління групами роботизованих пристроїв.

Аналіз методів та математичних моделей, придатних для опису процесів управління роями БПЛА, свідчить про те, що вони орієнтовані на забезпечення гнучкості, адаптивності та стійкості системи управління до змін обстановки та втрат окремих БПЛА рою.

З табл. 3 видно, що більшість математичних моделей описують децентралізоване управління

роями БПЛА в умовах їх бойового застосування. Крім того виявлено тенденцію до впровадження елементів штучного інтелекту, що дозволяє роям БПЛА адаптуватися до змін обстановки в режимі реального часу, а також забезпечує високий рівень автономності. Деякі моделі реалізовано у пакеті прикладних програм MATLAB/Simulink (зокрема пп. 3.4), що спрощує тестування алгоритмів.

Таблиця 4

Методи та математичні моделі, придатні для опису процесів розпізнавання цілей агентами роїв БПЛА

№ з/п	Математичні методи	Моделі	Показники (Опис)
4.	Методи та математичні моделі, придатні для опису процесів розпізнавання цілей агентами роїв БПЛА		
4.1	Метод управління групою різномірних БПЛА для пошуку та ураження динамічних об'єктів [39]	Модель інтелектуальної системи підтримки ухвалення рішень розпізнавання ситуації (ІСППР). Схема функціонування ІСППР складається з трьох рівнів: 1. Формування бази знань агента 1.1 Формування бази даних типових ситуацій. 1.2 Формування бази знань правил дій БПЛА. 2. Формування гіпотез ситуацій 2.1 Визначення міри відстані: $\sigma_j = \sqrt{\sum_{i=1}^k \omega_i (S_{kj} - S_{rj})^2}.$ 2.2 Відбір гіпотез ситуацій. - Умова: $\sigma' > \sigma_i$, $\sigma' = 0,5 * S_{kj}$. 2.3 Визначення міри подібності: $V_{жак}(S_{kj}, S_{rj}) = \frac{\sum_{j=1}^n S_{kj} S_{rj}}{\sum_{j=1}^n S_{kj} + \sum_{j=1}^n S_{rj} - \sum_{j=1}^n S_{kj} S_{rj}}.$ 2.4 Формування гіпотез ситуацій. 3. Синтез правил дій БПЛА 3.1 Формування правил дій агентів. 3.2 Синтез правил. 3.3 Формування набору правил дій БПЛА.	ω_i – вага ознаки пропорційна його важливості в структурі визначення ситуації (визначається методом експертного оцінювання); S_{kj} – значення елемента вектора ознак ситуації kj бази ситуацій; S_{rj} – значення елемента вектора ознак ситуації rj, отриманого в процесі розвідки; σ' – рівень відбору ситуацій; $V_{жак}(S_{kj}, S_{rj})$ – міра Жаккарда.
4.2	Методика оцінювання ефективності виконання бойового завдання підрозділами безпілотної авіації комплексів у складі розвідувально-ударної системи в операції оперативного угруповання військ (сил) [40]	Узагальнений показник ефективності РУС ОТУВ (с) (за умови, що всі об'єкти мають однакову пріоритетність): Модель функціонування розвідувально-ударної системи: $E_{wpyc} = \frac{M_{зpw}}{W_{зак}},$ де E_{wpyc} – узагальнений показник ефективності РУС ОТУВ (с).	E_{wpyc} – математичне сподівання кількості виконаних РУС ОТУВ (с) завдань повітряної розвідки щодо викриття (знищення) бойового потенціалу угруповання противника; $M_{зpw}$ – математичне сподівання бойового потенціалу угруповання військ противника, який за даних умов викривається (знищується) РУС ОТУВ (с); $W_{зак}$ – загальний бойовий потенціал угруповання противника, на викритті якого необхідно зосередити основні зусилля розвідки на даному етапі підготовки і ведення оборонного бою.
4.3	Метод математичного моделювання оптимального планування місій безпілотної авіації комплексів [41]	Створено і використано для тестування макетний стенд для імітаційного моделювання польотів групи БПЛА на базі мереж програмно-керованих радіостанцій чи стандартних промислових маршрутизаторів з можливістю керування потужністю передавачів, використання різнотипних джерел радіохвиль для позиціонування в умовах заглушення. Розроблено алгоритм упізнання літальних апаратів, який гарантує вищу криптографічну стійкість захисту інформації порівняно з тими, що використовуються нині ЗС України (завдяки використанню інформації зі спеціальних мереж та застосуванню сигнально-кодових конструкцій відповідно до стандартів НАТО).	Розроблено математичні моделі та алгоритми, що спрямовані на розв'язування задач, які виникають під час планування їхніх місій і стосуються комплектування та розміщення БПЛА, вибору цілей, а головне, узгодженої оптимізації їхніх маршрутів. Розв'язуються задачі комбінаторної оптимізації підвищеної розмірності та складності. Методику тестування алгоритмів криптографічного захисту інформації з використанням демонстраційного стенду, який імітує процеси державного впізнання об'єктів за принципом “свій-чужий”, впроваджено в НВЦ “Безпека інформаційних технологій і систем”. Розроблено алгоритм та програмно-алгоритмічне забезпечення для виявлення і фіксування атак на систему навігації БПЛАК.
4.4	Модель розпізнавання об'єктів на основі комп'ютерного зору безпілотної літальних апаратів [42]	Модель описує геометричні характеристики визначеного об'єкта щодо автоматизації розпізнавання та програмні модулі для супроводження його розпізнавання системами комп'ютерного зору БПЛА.	Розроблено модель та програму для БПЛА щодо розпізнавання визначеного об'єкта. Передбачає використання нейронних мереж.

Методи та математичні моделі, придатні для опису процесів розпізнавання цілей БпЛА рою, орієнтовані на забезпечення точного, швидкого та автономного ухвалення рішень у складному інформаційному середовищі. До найефективніших належать: інтелектуальні системи підтримки ухвалення рішень, моделі на основі нейронних мереж і комп'ютерного зору.

З табл. 5 видно, що розглянуті методи відображають тенденцію до інтеграції класичних методів оптимізації з елементами інтелектуального управління, що є особливо актуальним для задач цілерозподілу з різними варіантами сценаріїв конфлікту “неоднорідний рій

БпЛА – різнорідні об’єкти групової цілі противника”).

Отже, серед наукових праць, присвячених математичному моделюванню застосування роїв ударних БпЛА, виділено: математичне моделювання узгодженого руху групи БпЛА (табл. 1, пп. 1.1–1.8); математичне моделювання самоорганізації рою БпЛА (табл. 2, пп. 2.1–2.5); математичне моделювання управління роєм БпЛА (табл. 3, пп. 3.1–3.11); математичне моделювання розпізнавання цілей (табл. 4, пп. 4.1–4.4); математичне моделювання цілерозподілу у складі рою БпЛА (табл. 5, пп. 5.1–5.6).

Таблиця 5

Методи та математичні моделі, придатні для опису процесів цілерозподілу у роях БпЛА

№ з/п	Математичні методи	Моделі	Показники (Опис)
1	2	3	4
5	Методи та математичні моделі, придатні для опису процесів цілерозподілу у роях БпЛА		
5.1	Модель цілерозподілу різновидових засобів вогневого ураження [43]	Постановка задачі оптимізації, метою якої є забезпечення максимуму цільової функції: $f(x) = \max \sum_{j=1}^m A_j \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - w_{ij})^{x_{ij}} \right] \quad (1.1)$ з обмеженнями: $\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq N_i,$ $1 - \prod_{i=1}^n (1 - w_{ij})^{x_{ij}} \geq P_z.$ Задача математичного програмування належить до логарифмічної задачі про “М-рюкзаків”, у якій необхідно знайти оптимальну матрицю призначень. Така постановка задачі використовується під час вирішення завдання розподілу різнотипних ресурсів, зокрема сил та засобів ураження у вогневих ударах.	n – кількість груп засобів вогневого ураження ($i = 1, \dots, n$); m – кількість об’єктів ураження ($j = 1, \dots, m$); w_{ij} – ступінь ураження j-го об’єкта одним засобом i-ї групи вогневих засобів; A_j – коефіцієнт важливості об’єкта вогневого ураження; P_{zj} – заданий ступінь ураження j-го об’єкта; N_j – кількість ракет (літаків) у групі засобів i-го типу; x_{ij} – кількість боєприпасів (ракет, літаків-вильотів) i-ї групи вогневих засобів, призначених на j-й об’єкт.
5.2	Модель цілерозподілу [44]	Завдання цілерозподілу полягає у знаходженні матриці Q, що складається з елементів зі значеннями 0 або 1, що визначають призначення елемента i (БпЛА) взаємодіяти з об’єктом (ціллю) j чи ні. $Q(t)^* = \begin{pmatrix} \dots & & \\ \vdots & Q_{ij} & \vdots \\ \dots & & \end{pmatrix}$	Q – розподіл задач між БпЛА групи. Здійснено постановку задачі цілерозподілу із застосуванням технологій штучного інтелекту.
5.3	Модель раціонального розподілу засобів радіоелектронної боротьби по об’єктах радіоелектронного подавлення з урахуванням їхньої важливості [45]	$\Delta C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_j \cdot x_{ij} \rightarrow \max, \text{ за таких обмежень:}$ $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq N,$ $d_{ij} \geq 0, \quad i = 1 \div n, \quad j = 1 \div m,$ $\sum_{j=1}^m x_{ij} = x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{im} \leq 1, \quad i = 1 \div n,$ $\sum_{i=1}^n x_{ij} = x_{1j} + x_{2j} + \dots + x_{nj} \leq 1, \quad j = 1 \div m,$ $x_{ij} \in \{0;1\}$	n – канали перешкод; m – ліній управління (об’єктів РЕП) в СУВП; P – імовірність подавлення об’єктів РЕП; x_{ij} – цілочисельний аргумент ухвалення рішення про призначення i-го засобу РЕБ (каналу подавлення) на j-й об’єкт РЕП; c_j – ступінь важливості об’єктів РЕП; N – загальна кількість каналів перешкод (обсяг виділеного ресурсу); d_{ij} – коефіцієнт, який вказує на можливість призначення i-го каналу перешкод на j-й об’єкт РЕП, $d_{ij} \in \{0;1\}$. Завдання розподілу засобів РЕБ (каналів перешкод) по найбільш важливих об’єктах РЕП може бути вирішене через розв’язання “задачі про призначення”, яка є однією з відомих задач лінійного програмування або, за умов цілочисельності всіх або окремих змінних, задачею цілочисельного програмування.

1	2	3	4
5.4	Метод цілерозподілу ударних безпілотної літальних апаратів розподіленої системи управління угрупованням різномірних безпілотної літальних апаратів [46]	Завдання цілерозподілу зводиться до знаходження матриці: $X = (x_{ij})^{n,m}$, (1) де $x_{ij} = 1$, якщо j-й ударний БпЛА розподілений на i-ту ціль, та $x_{ij} = 0$ в іншому випадку. Вирішальний функціонал для кожної можливої k-ї комбінації пар БпЛА-ціль $D(k)$ має вигляд: $F = \sum_{i=1}^n C_i \prod_{j=1}^m (1 - P_{ij})^{x_{ij}}, \quad (2)$ де C_i – коефіцієнт, що характеризує важливість цілі; P_{ij} – ймовірність того, що j-й БпЛА знищить i-у ціль. Завдання розподілу розв'язується шляхом знаходження максимуму з ряду вирішальних функціоналів: $R = \max \{F\}. \quad (3)$ Інтегральний показник ефективності, що враховує важливість i-го об'єкта атаки та ймовірність бойового успіху кожного j-го потрібного наряду ударних БпЛА: $I = \max \sum_{i=1}^N C_i \omega_{ij}.$ ω_{ij} – ймовірності бойового успіху i-го ударного БпЛА при атаці j-ї цілі; N – кількість ударних БпЛА, що залишилися після подолання зони протиповітряної оборони противника. Метод цілерозподілу у пропонованій розподіленій системі управління групою БпЛА в автономному режимі реалізовано у середовищі MATLAB.	Проведено імітаційне моделювання координованої атаки групою ударних БпЛА з використанням розробленого методу і без його використання. Показник ефективності групових дій дозволяє максимізувати цільовий ефект важливості цілей. Завдання цілерозподілу зводиться до знаходження матриці (1), розрахунку вирішальних функціоналів (2), визначення найкращої комбінації за правилом (3). Процес повторного цілерозподілу ударних БпЛА в автономному режимі, який може бути реалізовано методом не повного перебору, шляхом розрахунку інтегрального показника ефективності, що враховує важливість кожного i-го об'єкта атаки C_i та ймовірність бойового успіху ω_{ij} кожного j-го потрібного наряду ударних БпЛА за кожного варіанта можливих втрат та вибору раціонального варіанта цілерозподілу, що відповідає максимальному інтегральному показнику ефективності: $I = \max \sum_{i=1}^N C_i \omega_{ij}. \quad (4)$ Переваги: управління груповими діями БпЛА здійснюється в автономному режимі, що дозволяє забезпечити скритність, мінімізувати втрати з боку групи БпЛА, максимізувати ураження противника і підвищити ефективність атаки групи БпЛА. Використання методу дало можливість покращити ефективність дій групи БпЛА за показником (4), порівняно із ситуацією, коли кожен БпЛА діє відповідно до вихідного польотного завдання в середньому на 10%.
5.5	Удосконалена методика розподілу груп БпЛА з урахуванням важливостей цілей та ймовірностей їх ураження [47]	Розв'язується задача максимізації цільової функції методом максимального елемента: $\bar{F}(X) = \sum_{i=1}^S A_i \varepsilon_i^{x_i}$ $\omega_i = 1 - \varepsilon_i,$ $\varepsilon_i = 1 - \omega_i$ $\omega_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^S W_i} = \frac{T_i}{\sum_{i=1}^S T_i} = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^S V_i}.$ Максимізація загальних втрат $F(X)$ еквівалентна максимізації величини середніх втрат із розрахунку на один із N засобів: $\max F(x) \sim \max \left\{ \frac{F(x)}{N} = v(X) \right\}.$	$\bar{F}(X)$ – цільова функція; N – обсяг ресурсу (однотипні одиниці бойових засобів – БпЛА); $i = 1, \dots, S$ – об'єкти (цілі); A_i – відносна важливість об'єкта (цілі) (ваговий коефіцієнт); X_i – ресурс, що надходить окремими однаковими партіями або всім обсягом (може застосовуватися по цілях у вигляді окремих партій X_i); ω_i – ймовірність ураження об'єкта i; ε_i – умовна ймовірність не ураження об'єкта; W_i – потрібні обсяги завдання (ступінь ураження) на i-му об'єкті застосування; T_i – потрібний час на виконання завдання на на i-му об'єкті застосування; V_i – потрібний темп виконання завдання на на i-му об'єкті застосування; $v(X)$ – середні втрати противника із розрахунку на один з N засобів.

Також визначено, що використовують математичне моделювання із застосуванням методів штучного інтелекту (табл.1–5, пп. 1.6–1.7; 2.5; 3.1, 3.4, 3.10; 4.4; 5.2, 5.4).

Моделювання застосування рою ударних БпЛА здійснювалось з використанням нейронних мереж, зокрема у пп. 1.6 (табл. 1), 3.4 (табл. 3), 5.4 (табл.

5) таке моделювання проводилось у пакеті прикладних програм MATLAB.

За умов певної адаптації наявні розробки у галузі нейронних мереж доречно використати під час моделювання застосування роїв ударних БпЛА.

Проте більш детальне вивчення даних табл. 1–5

дозволило виявити такі групи проблемних питань. Перша група проблемних питань свідчить про те, що у розглянутих моделях окремі процеси під час функціонування рою ударних БпЛА вивчалися зазвичай без узгодження (синхронізації) з іншими важливими процесами, зокрема питання опису траєкторії руху БпЛА рою, саморганізації рою, організації цілерозподілу між окремими ударними БпЛА тощо. По-перше, вони слабко пов'язані між собою і по-друге, не розглядаються такі важливі питання, як визначення раціонального складу рою та автоматизоване навчання рою.

Другою важливою групою проблемних питань залишається недостатня практична значущість окремих моделей (зокрема табл. 1, пп. 3, 5), а саме їх реалізація на рівнях “окремий підрозділ – частина – тактичне з'єднання” вимагатиме суттєвої перекомплектації систем обчислювальної техніки, засобів інформатизації та зв'язку (т. зв. “апгрейд”). Така перекомплектація часто буває ускладненою. Тому наведені методи й моделі практичної значущості набудуть лише у майбутньому.

Третьою групою проблемних питань є, на думку автора, недостатнє узгодження моделей, що описують дії рою БпЛА, із описом дій угруповання військ (сил) вищого рівня. При цьому слід розглядати як критерій ступінь відповідності ефективності застосування рою БпЛА, наданого у розпорядження, вимогам до управління угрупованням військ (сил) вищого рівня.

Четвертою групою проблемних питань є необхідність оперативного вибору (заміни) доречного за даних умов методу (алгоритму) опису процесів, що відбуваються із роєм БпЛА. Такий вибір (заміна) спричиняється необхідністю оперативно реагувати на зміни в обстановці за одночасних максимальної ефективності застосування рою БпЛА та узгодження з вимогами до системи управління угруповання військ (сил) вищого рівня.

Сучасний стан речей у досліджуваній галузі свідчить про таке. Насамперед, у ЗС України сформовано окремий полк БпЛА [49], тобто спостерігаємо появу БпЛА різного призначення у вартих уваги кількостях. Крім того, за рахунок і держави, і приватного бізнесу, і громадських організацій працюють школи операторів БпЛА – мережа навчальних підрозділів для підготовки фахівців відповідних профілів, причому відомо про обладнання навчальних класів на рухомій (автобусній) базі. Також відомо про створення рухомих ремонтних майстерень для БпЛА за аналогією із ПАРМ (пересувні авторемонтні майстерні). Отже, матеріальне підґрунтя для застосування роїв БпЛА в загальних рисах сформоване. З огляду на бойові можливості

зазначених систем ОВТ постає питання щодо перебудови системи управління військами – у цілому, а також створення (модернізації) систем управління роями БпЛА – зокрема.

Одним із перспективних підходів до такої модернізації є впровадження штучного інтелекту (ШІ). Застосування ШІ у системах управління військами дозволяє поєднувати за єдиним задумом, просторово-часовим розмахом тощо роботизовані засоби повітряного, наземного і морського базування. Такий підхід спроможний призвести до стрибкоподібних змін у розвитку воєнного мистецтва.

Зокрема, загальна теорія побудови й експлуатації груп дистанційно керованих (роботизованих, безпілотної) систем ОВТ побудована фрагментарно. Причому під групою мають на увазі сукупність БпЛА, які знаходяться одночасно в деякому районі, без безпосередньої взаємодії між собою. Функціональне ж поєднання БпЛА в рої для виконання спільних завдань потребує вирішення актуального питання, суть якого полягає в розробленні науково-методичного апарату для управління роєм БпЛА, що здійснюється на основі взаємодії між БпЛА, в умовах динамічної протидії противника.

Одним із можливих варіантів підходу до вирішення цього питання є використання нейронних мереж як технології, здатної, по-перше – максимально повно врахувати класичні принципи підготовки військ та управління ними, по-друге – досягти належної ефективності у застосуванні угруповання в цілому.

Обговорення

Дослідженню питань щодо застосування роїв ударних безпілотної літальних апаратів у мирний та воєнний час присвячено незначну кількість праць. Здебільшого це прості описові, математичні (розрахункові) моделі, які оцінюють окремі показники ефективності застосування рою БпЛА.

Встановлено, що на сьогодні немає наукових праць, у яких проблеми моделювання застосування рою БпЛА та оцінювання ефективності застосування рою БпЛА розглядалися б комплексно, на основі єдиного методологічного підходу. Розглянуто математичні методи (моделі), що можуть використовуватись для опису процесів застосування рою ударних БпЛА (табл. 1-5). Недосконалість наявних методів і відсутність єдиної методологічної основи для моделювання та оцінювання ефективності застосування рою БпЛА потребує розроблення математичної моделі застосування рою БпЛА (зокрема моделі цілерозподілу БпЛА рою по об'єктах групової цілі противника).

Необхідність розроблення методів моделювання та оцінювання ефективності

застосування рою БпЛА за сучасних умов та розроблення на основі отриманої оцінки обґрунтованих рекомендацій щодо вибору раціонального складу рою БпЛА, раціонального розподілу БпЛА по об'єктах групових цілей, управління роєм БпЛА визначають своєчасність та актуальність цієї теми.

Охарактеризовано особливості детермінованих і стохастичних моделей; окремо вказано на важливість практичного застосування технологій штучного інтелекту.

Встановлено, що етапами побудови математичної моделі є: дослідження об'єкта моделювання; концептуальна постановка задачі; математична постановка задачі; вибір та обґрунтування методу розв'язання задачі; реалізація математичної моделі у вигляді комп'ютерної програми; перевірка адекватності моделі; практичне використання та аналіз результатів моделювання [50, 51].

Результати аналізу наявних методів моделювання застосування рою БпЛА свідчать про те, що вони не мають послідовного характеру, а результати моделювання застосування рою БпЛА розкрито однобічно. Більшість моделей (табл. 1) описано на рівні концептуальної постановки математичної задачі, комплексно побудова зазначених моделей не здійснювалась. Крім того, не здійснювалась перевірка адекватності більшості розроблених моделей – ступеня відповідності результатів моделювання експериментальним даним або тестовій задачі.

Перевірка адекватності моделі має за мету переконатися в справедливості гіпотез, прийнятих на етапах концептуальної й математичної постановок, та встановлення того, що точність отриманих результатів відповідає встановленим вимогам.

Одним із перспективних підходів є використання нейронних мереж, які здатні моделювати залежності з високою точністю і мають переваги у продуктивності. Вони здатні вчитися на великих обсягах даних, здійснювати кластеризацію, класифікацію, робити прогноз тощо.

Визначено, що є значна кількість досліджень щодо використання як традиційних підходів, так і методів штучного інтелекту (а саме нейронних мереж) для вирішення різноманітних завдань розрахунку обходу БпЛА перешкод, управління групою БпЛА, розподілу цілей між БпЛА рою тощо. Безпосередньо використання нейронних мереж у відповідній предметній галузі розглядається в роботах [1–3].

НМ отримують певні дані (вхід / input),

обробляють їх у декілька етапів (приховані шари / hidden layers), а потім видають результат (вихід / output). Перевагами нейронних мереж є здатність до навчання, можливість працювати з неповними даними, можливість автоматизувати аналіз, висока точність результатів.

Однак задача цілерозподілу рою БпЛА по об'єктах групової цілі методами штучного інтелекту не розв'язувалась, що надає можливість запропонувати власний варіант. При цьому передбачається комплексне врахування всіх вимог та обмежень, що визначені угрупованням військ (сил) вищого рівня, які визначаються рою ударних БпЛА.

Оскільки нейрофізіологія надає розширене розуміння дії нейронів, а технологія обчислень постійно вдосконалюється, розробники нейронних мереж мають необмежений простір для вдосконалення моделей біологічного мозку [51].

Базовим елементом нейронної мережі є штучний нейрон. Він моделює основні функції нейрона мозку людини. Під час функціонування нейрон одночасно отримує багато вхідних сигналів. Кожен вхід має свою власну синаптичну вагу, яка є мірою сили вхідних зв'язків і моделює різноманітні синаптичні сили біологічних нейронів. Ваги суттєвого входу підсилюються і, навпаки, вага несуттєвого входу примусово зменшується, що визначає інтенсивність вхідного сигналу. Ваги можуть змінюватись відповідно до навчальних прикладів, топології мережі та навчальних правил. Вхідні сигнали x_n , зважені ваговими коефіцієнтами з'єднання w_n , додаються, проходять через передатну функцію, генерують результат і виводяться.

Штучні нейронні мережі є моделями нейронної структури мозку, який здатен сприймати, обробляти, зберігати та продукувати інформацію. Особливістю мозку також є навчання та самонавчання на власному досвіді. Адаптивні системи на основі штучних нейронних мереж дозволяють з успіхом вирішувати проблеми розпізнавання образів, виконання прогнозів, оптимізації, асоціативної пам'яті й керування.

Завдяки відповідному математичному моделюванню було створено багато архітектур штучних нейронних мереж, які нині широко використовуються у різних галузях науки і техніки. Тому вибір нейронної мережі для формування і навчання роїв БпЛА, а також для управління роєм є логічним і обґрунтованим.

На рис. 1 показано кількість нейронів у мозку різних видів істот: людини, восьминога, жаби, бджоли та кількість нейронів, яка може налічуватись у штучній нейронній мережі.

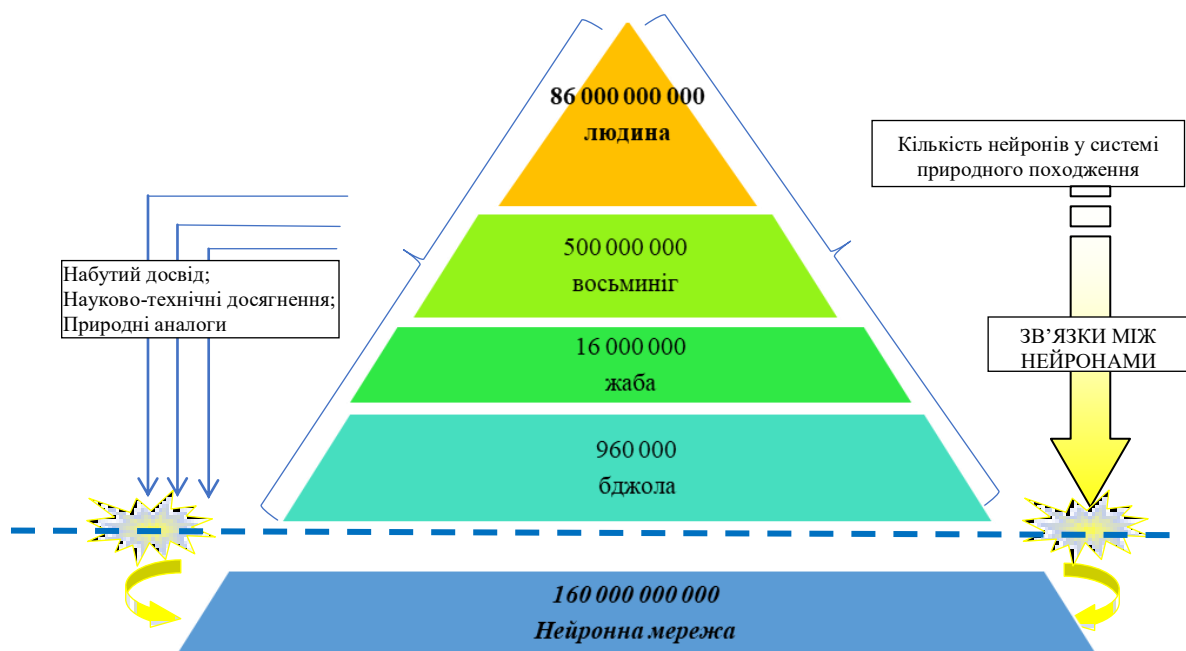


Рисунок 1. Порівняння кількості нейронів у мозку деяких живих істот та штучній нейронній мережі

Прокоментуємо рис. 1. Перевагою мозку людини над іншими є, крім багатократно більшої кількості нейронів, здатність створювати нові зв'язки і підтримувати або скасовувати наявні. Але через природні обмеження людського мозку за здатністю до запам'ятовування великих обсягів різномірної інформації та недостатню швидкість реакції на подразники постає необхідність у розробленні такого програмно-апаратного комплексу, який би відповідав побудові мозку людини – з одного боку, і переважав можливості людини (колективу людей) із запам'ятовування та швидкості реакції – з іншого.

Іншим важливим аналогом у живій природі є восьминіг. Попри порівняно меншу кількість нейронів, він має достатньо високочутливих робочих органів (кінцівок) у поєднанні з високою координацією рухів, здатністю до мімікрії та власною високою рухливістю. Подібну рухливість і здатність до маскуванню має й жаба. Тому застосування рою БпЛА як високоорганізованого робочого органу є також логічним і обґрунтованим.

Бджолиний рій як природний аналог цікавить, по-перше, рухливістю і маневреністю, по-друге, здатністю діяти у досить широких просторових рамках, по-третє, чіткою “спеціалізацією” комах із можливістю їх оперативної заміни (відтворення). Але недоліком рою бджіл є наявність незамінного керівного елемента – бджоломатки; у разі загибелі матки рій перестає існувати як єдине ціле.

Такий недолік можна усунути в рою БпЛА шляхом додаткового навчання визначених

апаратів певним алгоритмам дій за певних ситуацій.

Висновки

Отже, у статті проведено аналіз методів математичного моделювання застосування рою ударних БпЛА.

Показано, що для моделювання застосування роїв ударних БпЛА нині використовуються такі методи: математичного моделювання узгодженого руху групи БпЛА; математичного моделювання самоорганізації рою БпЛА; математичного моделювання управління роєм БпЛА; математичного моделювання розпізнавання цілей; математичного моделювання цілерозподілу БпЛА у складі рою.

Визначено, що задача цілерозподілу ударних БпЛА у рої не розв'язувалась з урахуванням вимог і обмежень угруповань військ (сил) вищого рівня. Як технологічну основу усунення такого недоліку запропоновано використання методів штучного інтелекту, а саме нейронних мереж.

Задача цілерозподілу ударних БпЛА по об'єктах групової цілі з урахуванням їхньої пріоритетності буде розв'язуватись методами штучного інтелекту, а саме за допомогою нейронних мереж. Основу мають становити методи та їх реалізація під час формування роїв БпЛА (визначення раціонального складу), управління роєм БпЛА та навчання нейронних мереж.

Для практичної реалізації можуть бути використані такі архітектури нейронних мереж, як мережі Колмогорова – Арнольда (Kolmogorov – Arnold Networks – KAN), що можуть навчатися з

меншою кількістю даних (т. зв. “згортання даних”) і мати більшу інтерпретованість.

Одним із підходів до роботи з мережами типу KAN є застосування технології Mixture of Experts (MoE). Завдяки їй множина нейронних мереж, подібно до команди фахівців (т. зв. “експертів”), об’єднує свої знання та навички для оброблення складних даних, що значно розширює можливості та покращує результати. Ця модель викликає зацікавленість завдяки її гнучкості та масштабованості, що є важливими факторами для управління роєм БПЛА в різноманітних середовищах.

З огляду на здатність моделі на основі технології MoE до масштабування та ефективного розподілу обчислювальних ресурсів відкриваються нові можливості для розроблення високопродуктивних систем спільного оброблення даних для роїв БПЛА, що може сприяти покращенню якості виконання завдань та оптимізації використання ресурсів.

Кінцевим результатом використання розглянутих методів і технологій є можливість підвищити ефективність управління як роєм БПЛА зокрема, так і угрупованням військ (сил) вищого рівня – у цілому. Головним при цьому є можливість комплексного врахування всіх вимог та обмежень (або їх максимально повного врахування), і таким чином відкривається шлях до практичного застосування методів штучного інтелекту.

Матеріали, представлені у статті, можуть бути корисними науковим та науково-педагогічним працівникам у галузі математичного моделювання складних систем воєнного призначення, а також здобувачам вищої освіти (курсантам, студентам, слухачам та ад’юнктам), які вивчають зазначені питання.

Список використаних джерел

1. Про рішення РНБО від 20 серпня 2021 року “Про Стратегічний оборонний бюлетень України”. Указ Президента України від 17.09.2021 р. № 473/2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0063525-21#Text> (дата звернення: 04.01.2025).
2. Воєнно-історичний опис російсько-української війни. У 63 Вип. 18: серпень 2023 р. МО України. Апарат Головнокомандувача ЗС України. ГШ ЗС України та Центр досліджень воєнної історії ЗС України. Київ. 2023. 204 с.
3. Мосов С. П. Роїння дронів військового призначення: реалії та перспективи. Зб. наук. пр. Центру воєнно-стратегічних досліджень Нац. ун-ту оборони України. 2024. № 1 (80). С. 77–86.
4. Горбулін В. П., Мосов С. П. Рої дронів – кульмінація дронізації воєн. Вісн. НАН України. 2024. № 3. С. 3–11.
5. Wu Chen, Jiayi Zhu, Jiajia Liu, Hongzhi Guo. A fast coordination approach for large-scale drone swarm. Journal of Network and Computer Applications. 2024. Vol. 221. URL: <http://surl.li/gsqkis>.

<https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103769>.

6. Muhammad Mubashir Iqbal, Zain Anwar Ali, Rehan Khan and Muhammad Shafiq. Motion Planning of UAV Swarm. Recent Challenges and Approaches. 2022. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/82985>. DOI: 10.5772/intechopen.106270.
7. Рої дронів: тренди українських БПЛА. URL: <https://surl.li/mzyiqg>
8. В Україні розробляють технологію “рою дронів”. URL: <https://mil.in.ua/uk/news/v-ukrayini-rozroblyayut-tehnologiyu-royu-droniv>/Оснащений штучним інтелектом та долає РЕБ: як працює новий український дрон. URL: <http://surl.li/oivqnx2>
9. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні. Розпорядження КМ України від 2.12.2020 № 1556-р. Ред. від 29.12.2021, підстава – 1787-2021-р. URL: <http://surl.li/lhdyuf>.
10. Про нарощування спроможностей сил оборони. Указ Президента України від 06.02.2024 № 51/2024. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/512024-49625> (дата звернення: 10.10.2024)
11. Шовкошитний І.І., Василенко О.А. Розроблення логіко-часової моделі ройового застосування ударних безпілотних літальних апаратів з урахуванням типових способів їх групового застосування в сучасних умовах. Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України. 2024. № 3(83). С. 108–116.
12. Майзер Х., Ейджин Н., Тролл Р. Исследование операций. У 2 т. Москва. Мир. 1981. Т.1. 712 с.
13. Аргюшин Л. М., Зиятдинов Ю. К., Попов И. А., Харченко А. В. Большие технические системы: проектирование и управление. Харьков. Факт. 1997. 400 с.
14. Воронин А. Н., Зиятдинов Ю. К., Ку克林ский М. В. Многокритериальные решения: модели и методы. Моногр. Київ. НАУ. 2011. 348 с.
15. Reynolds C. W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. ACM SIGGRAPH Computer Graphics. 1987. № 21.(4). Р. 25–34.
16. Мартинюк О. Р. Модель узгодженого руху групи безпілотних літальних апаратів. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. НУОУ. 2016. № 1 (25). С. 78–81.
17. Голембо В. А., Мельніков Р. Г. Організація роботи групи безпілотних літальних апаратів. Львів. Нац. ун-т “Львівська політехніка”. 2018. С. 53–63.
18. Van Nguyen L., Phung M. D., Ha Q. P. Game Theory-Based Optimal Cooperative Path Planning for Multiple UAVs. IEEE Access. 2022. Vol. 10. Pp. 108034–108045. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3213035.
19. Журавська І. Гетерогенні комп’ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БПЛА. Моногр. Миколаїв. Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. 2019. 192 с.
20. Бережний А. О. Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об’єктів. Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Харків. ХНУПС. 2020.
21. Журавська І. М. Синтез маршрутів суброїв безпілотних апаратів з використанням нейронної мережі Хопфілда для обстеження території. Радіоелектроніка,

інформатика, управління. 2017. № 3. С. 86–94.

22. Журавська І. М. Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування. Дис. ... докт. техн. наук: 05.13.05. Миколаїв. Чорноморський нац. ун-т ім. Петра Могили. 2019. 416 с.

23. Атрохов А. В., Вернер І. Е. та ін. Основи моделювання бойових дій військ. Підр. За заг. ред. докт. техн. наук, проф. полковника О. Ю. Пермякова. Київ. НАОУ. 2005. 481 с.

24. Основи моделювання у сфері озброєння та військової техніки. Підр. За ред. В. І. Мірненка. Київ. НУОУ. 2019. 280 с.

25. Мартинюк О. Р., Медведєв В. К. Підхід до формування колективних задач при груповому застосуванні безпілотної авіації. Повітряна міць України. 2024. № 2 (7). С. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-80-86>.

26. Василь Литвин, Дмитро Угрин. Методи ройового інтелекту вирішення прикладних задач в геоінформаційних системах. Інформаційні системи та мережі. Вісник нац. ун-ту “Львівська політехніка”. Львів. 2020. Вип. 7. С. 87–106. DOI: <https://doi.org/10.23939/sisn2020.07>.

27. Кутахов В. П., Мещеряков Р. В. Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта. DOI: <http://doi.org/10.25728/pu.2022.1.5>

28. Шовкошитний І. І., Василенко О. А. Проблемні питання ройового застосування ударних безпілотнох літальних апаратів. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Наук. журн. Нац. ун-т оборони України. Київ. 2023. Т. 48. № 3. С. 27–34. DOI: <http://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-48-3-27-34>.

29. Ершов Н. М. Разработка и исследование распределенных алгоритмов управления системами роевого интеллекта. Comp. nanotechnol. 2022. Т. 9. Вип. 2. С. 21–34.

30. Савченко В. А. Модель руху пошукового агента при координації управління. Системи обробки інформації. Харків. ХУПС. 2011. Вип. 4 (94). С. 278–280.

31. Петрикевич Я. И. Линейные алгоритмы управления геометрическим расположением объектов в многоагентной системе. Управление большими системами. URL: <https://surl.li/tucxgw>.

32. Муслимов Т. З. Методы и алгоритмы группового управления беспилотными летательными аппаратами самолетного типа. URL: <https://surl.li/exbzez>.

33. Ярошенко Я. В., Герасименко В. В., Коротін С. М., Мартинюк О. Р., Блискун, О. Є. (2022). Алгоритм процесу управління спільною авіаційною групою за етапами бойового польоту. Повітряна міць України. № 1(2(3)). С. 29–34. DOI: [https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-2\(3\)-29-34](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-2(3)-29-34).

34. Погудіна О. К. та ін. Методологія формування інтелектуальної складової агентної системи рою безпілотнох літальних апаратів. Моногр. Харків. НАУ ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». 2021. 219 с.

35. Иванов Д. Я. Методы роевого интеллекта для управления группами малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Известия ЮФУ. С. 221–229.

URL: <http://surl.li/qmeorl>.

36. Дахно Н. Б. Моделі прийняття рішень для дистанційного керування безпілотною літальними апаратами на основі варіаційно-градієнтних методів. Держ. ун-т телекомунікацій. 05.13.06 Інформаційні технології. 161 с.

37. Житецький Л. С. (2023). Методи управління і оцінювання в умовах невизначеності. Проблеми керування та інформатики. № 5. С. 47–63.

38. Єрофєєва В. О. Управление роём динамических объектов на базе мультиагентного подхода. URL: <https://surl.li/grmsgo>.

39. Гурін І., Матвєєв Л. (2023). Мультиагентна модель пункту управління групою безпілотнох літальних та наземних апаратів при виконанні спеціальних місій. Випробування та сертифікація. № 1 (1). С. 39–47. <https://doi.org/10.37701/ts.01.2023.05>

40. Ікаєв Д. Удосконалена методика оцінювання ефективності застосування розвідувальних (розвідувально-ударних, ударних) безпілотнох авіаційних комплексів у складі розвідувально-ударної системи в операції оперативно-тактичного угруповання військ (сил). Сектор безпеки і оборони України на захисті національних інтересів: актуальні проблеми та завдання в умовах воєнного стану. Тези Міжн. наук.-практ. конф. (24 лист. 2022 р.). Хмельницький. Вид-во НАДПСУ. 2023. С. 169–171.

41. Гуляницький Л. Ф. Оптимізація рішень при плануванні місій безпілотнох літальних апаратів: Стенограма виступу на сесії Загальних зборів НАН України 27 квітня 2023 р. Вісник Нац. академії наук України. № 5. С. 75–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/vsn2023.05.075>

42. Брюховецький О. А. Розроблення системи розпізнавання об'єктів на основі комп'ютерного зору безпілотнох літальних апаратів. Магістерська робота. Харківський нац. ун-т радіоелектроніки. 2022. 53 с. URL: <http://surl.li/gysqj>.

43. Таха Х. Введение в исследование операций. Москва. “Вильямс”. 2001. 912 с.

44. Кутахова В. П., Мещеряков Р. В. Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта. Проблемы управления. 2022. Вип. 1. С. 67–74. DOI: <https://doi.org/10.25728/pu.2022.1.5>.

45. Шовкошитний І. І. Методика обґрунтування вихідних даних для оцінювання бойових можливостей частин радіоелектронної боротьби. Системи озброєння і військова техніка. 2008. № 1. С. 136–140.

46. Пархоменко Д. О., Осієвський С. В., Захарченко І. В., Черток, О. А., Щенякін О. В. Математична формалізація управління групою інтелектуальних безпілотнох літальних апаратів. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2024. № 4 (53). С. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.53.07>.

47. Самойленко О. В., Богославець С. О., Шешенко П. М., Наусенко Б. Ю. Особливості керування спільними бойовими порядками безпілотнох і пілотованих літальних апаратів. Київ. Держ. наук.-досл. ін-т авіації. 2021. Вип. № 17 (24). С. 45–49.

48. Приміренко В. М., Дем'янюк А. В. Програмний засіб оптимального розподілу ресурсу цілеспрямованого

процесу. Державна безпека України в умовах російської агресії: актуальні питання експертно-криміналістичного та науково-технічного забезпечення. Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції (22 серпня 2023 р.). Т. 2. Київ. ІСТЕ СБУ. 2023. 212 с.

49. Команда ЯСТРУБИ 411 полк БпАК. URL: <https://surl.li/cbvhia>.

50. Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления. URL: <https://surl.li/roablf>.

51. Митрахович М. М., Силков В. И., Самков А. В., Бурштынская Х. В. Беспилотные авиационные комплексы. Методика сравнительной оценки боевых возможностей. Київ. ЦНІИ ВВТ ВС України. 2012. 288 с.

Olha Vasylenko

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

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

ANALYSIS OF METHODS OF MATHEMATICAL MODELING OF THE USE OF A SWARM OF STRIKING UNMANNED AERIAL VEHICLES

The experience of the Russian-Ukrainian war shows that one of the promising areas for improving the effectiveness of combat operations in modern conditions is the transition to group (swarm) use of unmanned systems for joint reconnaissance and strike missions. In view of this, the article is devoted to solving an urgent scientific task, which is to analyze the methods of mathematical modeling of the use of a swarm of strike unmanned aerial vehicles (UAVs) and to identify possible approaches to their improvement.

The relevance of the article is due to the need to determine a method of modeling the use of a swarm of strike UAVs that would increase the effectiveness of defeating group targets of the enemy and contribute to achieving superiority over the enemy, taking into account the requirements and limitations determined by a group of troops (forces) of a higher level. For this purpose, the methods of mathematical modeling of the use of a swarm of strike UAVs and algorithms for their implementation were analyzed. The study used general scientific methods (analysis, comparison, analogies), certain provisions of the systemic approach, certain provisions of the theories of probability, system reliability, and artificial intelligence methods.

It was determined that the task of target allocation of strike UAVs in a swarm has not been solved comprehensively. It is advisable to solve it using artificial intelligence methods, namely neural networks. The main unresolved issues are: the formation of a strike UAV swarm and its training using neural networks, which would combine the capabilities of the human brain with the ability to learn and adapt to external conditions, as well as the ability to store large amounts of data and quickly process them using modern computing equipment.

Further areas of research are the creation of more specialized multilayer neural networks for controlling the use of a swarm of strike UAVs, dynamic distribution of a swarm of attack UAVs by elements of non-stationary group targets of the enemy, taking into account the priority of their elements

Keywords: *mathematical modeling, strike unmanned aerial vehicles, swarm technology, neural networks, effectiveness of defeating non-stationary group targets, swarm management, artificial intelligence, Russian-Ukrainian war.*

References

1. Pro rishennia RNBO vid 20 serpnia 2021 roku "Pro Stratehichnyi oboronnyi biuleten Ukrainy". Ukaz Prezydenta Ukrainy vid 17.09.2021 r. № 473/2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0063525-21#Text> (data zvernennia: 04.01.2025).
2. Voienno-istorychnyi opys rosiisko-ukrainskoi viiny. U 63 Vyp. 18: serpen 2023 r. MO Ukrainy. Aparat Holovnokomanduvacha ZS Ukrainy. HSh ZS Ukrainy ta Tsentr doslidzhen voiennoi istorii ZS Ukrainy. Kyiv. 2023. 204 s.
3. Mosov S. P. Roinnia droniv viiskovoho pryznachennia: realii ta perspektyvy. Zb. nauk. pr. Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Nats. un-tu oborony Ukrainy. 2024. № 1 (80). S. 77–86.
4. Horbulin V. P., Mosov S. P. Roi droniv – kulminatsiia droidzatsii voien. Visn. NAN Ukrainy. 2024. № 3. S. 3–11.
5. Wu Chen, Jiayi Zhu, Jiajia Liu, Hongzhi Guo. A fast coordination approach for large-scale drone swarm. Journal of Network and Computer Applications. 2024. Vol. 221. URL: <http://surl.li/gsqkis>.

<https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103769>.

6. Muhammad Mubashir Iqbal, Zain Anwar Ali, Rehan Khan and Muhammad Shafiq. Motion Planning of UAV Swarm. Recent Challenges and Approaches. 2022. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/82985>. DOI: 10.5772/intechopen.106270.
7. Roi droniv: trendy ukrainskykh BpLA. URL: <https://surl.li/mzyiqg>
8. V Ukraini rozrobliaiut tekhnolohiiu "roi droniv". URL: <https://mil.in.ua/uk/news/v-ukrayini-rozroblyayut-tehnologiyu-royu-droniv>/Оснащений штучним інтелектом та дolaie REB: yak pratsiuie novyi ukrainskyi dron. URL: <http://surl.li/oivqnx2>
9. Pro skhvalennia Kontseptsii rozvytku shchynoho intelektu v Ukraini. Rozporiadzhennia KM Ukrainy vid 2.12.2020 № 1556-r. Red. vid 29.12.2021, pidstava – 1787-2021-r. URL: <http://surl.li/lhdyf>.
10. Pro naroshchuvannia spromozhnosti syl oborony. Ukaz Prezydenta Ukrainy vid 06.02.2024 № 51/2024. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/512024-49625> (data zvernennia: 10.10.2024)
11. Shovkoshytnyi I.I., Vasylenko O.A. Rozrobliennia lohiko-chasovoi modeli roiovoho zastosuvannia udarnykh

- bezpilotnykh litalnykh apparativ z urakhuvanniam tipovykh sposobiv yikh hrupovoho zastosuvannya v suchasnykh umovakh. Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy. 2024. № 3(83). S. 108–116.
12. Maizer Kh., Eidzhyn N., Troll R. Yssledovanye operatsyi. U 2 t. Moskva. Myr. 1981. T.1. 712 s.
13. Artiushyn L. M., Zyatdynov Yu. K., Popov Y. A., Kharchenko A. V. Bolshye tekhnicheskyye systemy: proektyrovanye y upravlenye. Kharkov. Fakt. 1997. 400 s.
14. Voronyn A. N., Zyatdynov Yu. K., Kuklynskyi M. V. Mnohokryterialnye resheniya: modely y metody. Monohr. Kyiv. NAU. 2011. 348 s.
15. Reynolds C. W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. ACM SIGGRAPH Computer Graphics. 1987. № 21.(4). P. 25–34.
16. Martyniuk O. R. Model uzgodzhenoho rukhu hrupy bezpilotnykh litalnykh apparativ. Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony. NUOU. 2016. № 1 (25). S. 78–81.
17. Holembo V. A., Melnikov R. H. Orhanizatsiia roboty hrupy bezpilotnykh litalnykh apparativ. Lviv. Nats. un-t "Lvivska politehnika". 2018. S. 53–63.
18. Van Nguyen L., Phung M. D., Ha Q. P. Game Theory-Based Optimal Cooperative Path Planning for Multiple UAVs. IEEE Access. 2022. Vol. 10. Rp. 108034–108045. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3213035.
19. Zhuravska I. Heterohenni kompiuterni merezhi krytychnoho zastosuvannya na osnovi roiv ta zghrai BpLA. Monohr. Mykolaiv. Vyd-vo ChNU im. Petra Mohyly. 2019. 192 s.
20. Berezhnyi A. O. Metody ta informatsiina tekhnologhiia avtomatyzovanoho planuvannya marshrutiv polotiv bezpilotnykh litalnykh apparativ dlia pidvyshchennia efektyvnosti poshuku ob'ektiv. Dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.06. Kharkiv. KhNUPS. 2020.
21. Zhuravska I. M. Syntez marshrutiv subroiv bezpilotnykh apparativ z vykorystanniam neironnoi merezhi Khopfilda dlia obstezhennia terytorii. Radioelektronika, informatyka, upravlinnia. 2017. № 3. S. 86–94.
22. Zhuravska I. M. Teoretychni osnovy, metody ta zasoby stvorennia ta funktsionuvannya shvydkodynamichnykh heterohennykh kompiuternykh merezh krytychnoho zastosuvannya. Dys. ... dokt. tekhn. nauk: 05.13.05. Mykolaiv. Chornomorskyi nats. un-t im. Petra Mohyly. 2019. 416 s.
23. Atrokhov A. V., Verner I. E. ta in. Osnovy modeliuvannya boiovykh dii viisk. Pidr. Za zah. red. dokt. tekhn. nauk, prof. polkovnyka O. Yu. Permiakova. Kyiv. NAOU. 2005. 481 s.
24. Osnovy modeliuvannya u sferi ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki. Pidr. Za red. V. I. Mimenka. Kyiv. NUOU. 2019. 280 s.
25. Martyniuk O. R., Medvediev V. K. Pidkhyd do formuvannya kolektyvnykh zadach pry hrupovomu zastosuvanni bezpilotnoi aviatsii. Povitriana mits Ukrainy. 2024. № 2 (7). S. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-80-86>.
26. Vasyl Lytvyn, Dmytro Uhryn. Metody roiovoho intelektu vyryshennia prykladnykh zadach v heoinformatsiinykh systemakh. Informatsiini systemy ta merezhi. Visnyk nats. un-tu "Lvivska politehnika". Lviv. 2020. Vyp. 7. S. 87–106. DOI: <https://doi.org/10.23939/sisn2020.07>.
27. Kutakhov V. P., Meshcheriakov R. V. Upravlenye hruppovym povedeniyem bespylotnykh letatelnykh apparatov: postanovka zadachy pryimeneniya tekhnologii yskusstvenoho yntellekta. DOI: <http://doi.org/10.25728/pu.2022.1.5>
28. Shovkoshytnyi I. I., Vasylenko O. A. Problemni pytannia roiovoho zastosuvannya udarnykh bezpilotnykh litalnykh apparativ. Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony. Nauk. zhurn. Nats. un-t oborony Ukrainy. Kyiv. 2023. T. 48. № 3. S. 27–34. DOI: <http://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-48-3-27-34>.
29. Ershov N. M. Razrabotka y yssledovanye raspredelennykh alhorytmov upravleniya systemamy roevoho yntellekta. Comp. nanotechnol. 2022. T. 9. Vyp. 2. S. 21–34.
30. Savchenko V. A. Model rukhu poshukovoho ahenta pry koordynatsii upravlinnia. Systemy obrobky informatsii. Kharkiv. KhUPS. 2011. Vyp. 4 (94). S. 278–280.
31. Petrikevich Ya. I. Lineinie algoritmi upravleniya geometricheskimi raspolozheniem ob'ektov v mnogoagentnoi sisteme. Upravlenie bolshimi sistemami. URL: <https://surl.li/tucxgw>.
32. Muslimov T. Z. Metodi i algoritmi gruppovogo upravleniya bespilotnimi letatelnyimi apparatami samoletnogo tipa. URL: <https://surl.li/exbzez>.
33. Yaroshenko Ya. V., Herasymenko V. V., Korotin S. M., Martyniuk O. R., Blyskun, O. Ye. (2022). Alhorytm protsesu upravlinnia spilnoi aviatsiinoiu hrupoiu za etapamy boiovoho polotu. Povitriana mits Ukrainy. № 1(2(3)). S. 29–34. DOI: [https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-2\(3\)-29-34](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-2(3)-29-34).
34. Pohudina O. K. ta in. Metodolohiia formuvannya intelektualnoi skladovoi ahentnoi systemy roiu bezpilotnykh litalnykh apparativ. Monohr. Kharkiv. NAU im. M. Ye. Zhukovskoho «KhAI». 2021. 219 s.
35. Yvanov D. Ya. Metody roevoho yntellekta dlia upravleniya hruppamy malorazmernykh bespylotnykh letatelnykh apparatov. Yzvestiya YuFU. S. 221–229. URL: <http://surl.li/qmeorl>.
36. Dakhno N. B. Modeli pryiniattia rishen dlia dystantsiinoho keruvannya bezpilotnykh litalnykh apparatamy na osnovi variatsiino-hradiientnykh metodiv. Derzh. un-t telekomunikatsii. 05.13.06 Informatsiini tekhnologii. 161 s.
37. Zhytetskyi L. S. (2023). Metody upravlinnia i otsiniuvannya v umovakh nevyznachenosti. Problemy keruvannya ta informatyky. № 5. S. 47–63.
38. Yerofieieva V. O. Upravlenye roem dynamicheskikh ob'ektov na baze multyagentnogo podkhoda. URL: <https://surl.li/grmsgo>.
39. Hurin I., Matvieiev L. (2023). Multyagentna model punktu upravlinnia hrupoiu bezpilotnykh litalnykh ta nazemnykh apparativ pry vykonanni spetsialnykh misii. Vyprovuvannya ta sertyfikatsiia. № 1 (1). S. 39–47. <https://doi.org/10.37701/ts.01.2023.05>
40. Ikaiev D. Udoskonalena metodyka otsiniuvannya efektyvnosti zastosuvannya rozviduvalnykh (rozviduvalno-udarnykh, udarnykh) bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv u skladi rozviduvalno-udarnoi systemy v operatsii operativno-taktychnoho uhrupovannya viisk (syl). Sektor bezpeky i oborony Ukrainy na zakhysti natsionalnykh interesiv: aktualni problemy ta zavdannia v umovakh voiennoho stanu. Tezy Mizhn. nauk.-prakt. konf. (24 lyst. 2022 r.). Khmelnytskyi. Vyd-vo NADPSU. 2023. S. 169–171.
41. Hulianytskyi L. F. Optymizatsiia rishen pry planuvanni misii bezpilotnykh litalnykh apparativ: Stenohrama vystupu na sesii Zahalnykh zboriv NAN Ukrainy 27 kvitnia 2023 r. Visnyk Nats. akademii nauk Ukrainy. № 5. S. 75–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2023.05.075>
42. Briukhovetskyi O. A. Rozroblennia systemy rozpiznavannya ob'ektiv na osnovi kompiuternoho zoru bezpilotnykh litalnykh apparativ. Mahisterska robota. Kharkivskyi nats. un-t radioelektroniky. 2022. 53 s. URL:

<http://surl.li/gysqj>.

43. Takha Kh. Vvedeniye v yssledovaniye operatsyi. Moskva. "Vyliams". 2001. 912 s.

44. Kutakhova V. P., Meshcheriakov R. V. Upravleniye hruppovym povedeniyem bespylotnykh letatelnykh apparatov: postanovka zadachy pryimeneniya tekhnolohiyi yskusstvennogo yntellekta. Problemy upravleniya. 2022. Vyp. 1. S. 67–74. DOI: <https://doi.org/10.25728/pu.2022.1.5>.

45. Shovkoshytnyi I. I. Metodyka obgruntuvannia vykhidnykh danykh dlia otsiniuvannia boiovykh mozhlyvostei chastyn radioelektronnoi borotby. Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. 2008. № 1. S. 136–140.

46. Parkhomenko D. O., Osiievskyi S. V., Zakharchenko I. V., Chertok, O. A., Shcheniakin O. V. Matematychna formalizatsiia upravlinnia hrupoiu intelektualnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ. Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. 2024. № 4 (53). С. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.53.07>.

47. Samoilenko O. V., Bohoslavets S. O., Steshenko

P. M., Nausenko B. Yu. Osoblyvosti keruvannia spilnymy boiovymy poriadkamy bezpilotnykh i pilotovanykh litalnykh aparativ. Kyiv. Derzh. nauk.-dosl. in-t aviatsii. 2021. Vyp. № 17 (24). S. 45–49.

48. Prymirenko V. M., Demianiuk A. V. Prohramnyi zasib optymalnoho rozpodilu resursu tsilespryamovanoho protsesu. Derzhavna bezpeka Ukrainy v umovakh rosiiskoi ahresii: aktualni pytannia ekspertno-kryminalistychnoho ta naukovo-tekhnichnoho zabezpechennia. Zbirnyk materialiv Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii (22 serpnia 2023 r.). T. 2. Kyiv. ISTE SBU. 2023. 212 s.

49. Komanda YaSTRUBY 411 polk BpAK. URL: <https://surl.li/cbvhia>.

50. Boltyanskii V. G. Matematicheskie metody optimalnogo upravleniya. URL: <https://surl.li/roablf>.

51. Mytrakhovych M. M., Sylkov V. Y., Samkov A. V., Burshtynskaia Kh. V. Bespylotnye avyatsyonnye komplekсы. Metodyka sravnytelnoi otsenky boevykh vozmozhnostei. Kyiv. TsNYY VVT VS Ukrainy. 2012. 288 s.