

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПІЛОТОВАНОЇ ТА БЕЗПІЛОТНОЇ АВІАЦІЇ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-48-56

УДК [004.8/004.942+519.863]::[623.746-519::531.133.1]

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

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

²Василенко Ольга Анатоліївна

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

¹Національний університет оборони України, Київ, Україна

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

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАСТОСУВАННЯ РОЮ УДАРНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ УРАЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ГРУПОВИХ ЦІЛЕЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У статті розроблено математичну модель застосування рою ударних безпілотнох літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей противника із використанням елементів штучного інтелекту, яка, відповідно до представленої діаграми Ганта, дозволяє математично формалізувати найбільш суттєві етапи застосування рою ударних безпілотнох літальних апаратів (виявлення та розпізнавання (ідентифікація) цілей заданих класів; вибір алгоритму управління цілерозподілом рою ударних безпілотнох літальних апаратів; атака ідентифікованих цілей; оцінка (контроль) результатів ураження цілей). Математична модель поєднує: нейронні мережі кластеризації та класифікації ударних безпілотнох літальних апаратів і об'єктів групових цілей, на основі яких отримується матриця ефективності ураження об'єктів групових цілей певним класом ударних безпілотнох літальних апаратів; математичну модель динамічного цілерозподілу рою різнотипних ударних безпілотнох літальних апаратів по об'єктах нестационарних групових цілей з урахуванням їх пріоритетності, яка включає дві взаємопов'язані математичні моделі – на основі оптимізаційних задач та навченої нейронної мережі.

Показано, що поєднання алгоритмічних та нейромережових підходів дозволяє розв'язувати задачу цілерозподілу рою ударних безпілотнох літальних апаратів по різнорідних об'єктах нестационарної групової цілі у реальному масштабі часу з урахуванням зміни складу групової цілі та рою ударних безпілотнох літальних апаратів. При цьому математична модель цілерозподілу рою ударних безпілотнох літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей на основі оптимізаційних задач дозволяє отримати набори даних для навчання нейронної мережі цілерозподілу, яка використовується у разі: значної розмірності задачі, коли оптимізаційна задача не дає можливості оперативно отримувати результати цілерозподілу; неповноти вхідних даних про об'єкти групових цілей противника в умовах невизначеності.

Крім того, розроблена математична модель ураховує: основні сценарії несиметричного конфлікту “неоднорідний рій безпілотнох літальних апаратів – різнорідні об'єкти групової цілі противника” та пріоритетність варіантів призначень; пріоритети ураження об'єктів групових цілей, їх прикриття засобами протиповітряної оборони, імовірності їх ураження та досяжність для ударних безпілотнох літальних апаратів рою.

Ключові слова: математична модель, бойове застосування рою ударних безпілотнох літальних апаратів, нейронна мережа, ефективність ураження, нестационарна груповою цілю, динамічний цілерозподіл, оптимізація, кластеризація, класифікація, штучний інтелект, ресурс рою, пріоритети ураження, варіанти призначення.

Вступ

Розвиток та застосування безпілотнох систем свідчить про суттєве зростання ролі ударних безпілотнох літальних апаратів (БпЛА) у сучасних збройних конфліктах, зокрема у російсько-українській війні [1–5]. Застосування роїв ударних БпЛА дозволяє здійснювати масовані, синхронізовані та високоточні удари по нестационарних групових цілях (ГЦ) противника як

на передньому краї, так і у глибині його бойових порядків. Однак ефективне управління застосуванням роєм БпЛА вимагає розв'язання низки складних задач, пов'язаних зі швидкою зміною обстановки, зміною складу рою та складу групової цілі, впливом засобів радіоелектронного та вогневого впливу противника.

Одним із ключових етапів, який впливає на ефективне застосування рою ударних БпЛА, є

цілерозподіл ударних БпЛА по об'єктах нестационарних групових цілей, склад та пріоритети ураження яких змінюються у реальному масштабі часу. Традиційні підходи до здійснення цілерозподілу, що базуються на статичних оптимізаційних моделях, не забезпечують розв'язання задачі цілерозподілу в умовах застосування неоднорідної групи (рою) БпЛА, що є необхідною умовою оптимального використання ресурсу групи (рою) БпЛА. У цьому разі доречним є використання інтелектуальних методів управління застосуванням рою ударних БпЛА на основі нейронних мереж (НМ), які здатні адаптивно здійснювати динамічний цілерозподіл рою ударних БпЛА в умовах швидкоплинної обстановки.

Аналіз наукових публікацій та досліджень [6–12] свідчить про наявність доволі розвинутого методичного апарату, який може бути застосований для опису процесів функціонування безпілотної систем, проте дослідженню питань математичного моделювання застосування рою ударних БпЛА приділялось менше уваги. При цьому наявні праці мають або занадто вузьку спрямованість, або в узагальненому вигляді описують процеси взаємодії БпЛА у групі (рою). Здебільшого це прості математичні (розрахункові) моделі, що описують окремі процеси застосування рою ударних БпЛА, а саме: узгоджений рух групи БпЛА, їх самоорганізацію, управління, розпізнавання цілей та цілерозподіл. Проте питання розподілу неоднорідного ресурсу рою ударних БпЛА для ураження нестационарних ГЦ в умовах реального часу потребують математичної формалізації з використанням технологій штучного інтелекту, який нині активно впроваджується у військовій галузі [13].

Це зумовлює необхідність розроблення математичного апарату застосування рою ударних БпЛА, який би поєднував відомі оптимізаційні підходи та елементи штучного інтелекту під час розв'язання задач класифікації БпЛА і об'єктів ГЦ, цілерозподілу з урахуванням пріоритетності їх ураження та забезпечував адаптивність управління таким цілерозподілом.

Зважаючи на зазначене, **метою статті** є розроблення математичної моделі застосування рою ударних БпЛА із використанням елементів штучного інтелекту.

Матеріали та методи

Дослідження обраної у статті тематики базується на використанні окремих положень системного підходу до розв'язання складних завдань, методів оптимізації (зокрема лінійного цілочисельного програмування), відомих з теорії дослідження операцій та методів штучного інтелекту.

Результати

В основу математичної моделі застосування рою ударних БпЛА для ураження нестационарних групових цілей противника із використанням елементів штучного інтелекту покладено результати досліджень проблемних питань

ройового застосування ударних БпЛА [14], логіко-часову модель ройового застосування ударних БпЛА, яка була розроблена та опублікована авторами у [14, 15]. Було показано, що процес ройового застосування рою БпЛА має значну кількість етапів, які за змістом та принципами розв'язання завдань значно відрізняються. Найбільш суттєвими проблемними питаннями є: складність та різноманітність алгоритмів ройової взаємодії БпЛА-агентів у складі рою; необхідність адаптивного комбінування централізованого та децентралізованого способів управління роєм на основі принципів самоорганізації; складність організації децентралізованого (без участі оператора) інформаційного обміну між БпЛА-агентами у складних умовах обстановки; складність вирішення завдань розпізнавання ситуацій або конкретних цілей; необхідність адаптивного вибору алгоритмів цілерозподілу ударних БпЛА рою з урахуванням умов обстановки та набору критеріїв (пріоритет цілей, їх доступність та захищеність, час на прийняття рішення тощо). Водночас, алгоритми мають оперативно коригуватись у реальному масштабі часу залежно від зміни поточної ситуації (втрати частини БпЛА, маневру цілей, навісної невогневої протидії тощо). Зазначене потребуватиме інтеграції програмного забезпечення усіх агентів рою БпЛА для забезпечення координації їх взаємного положення, перенацілювання та керування корисним навантаженням тощо. Важливість проблеми цілерозподілу полягає в тому, що від нього залежить ефективність, живучість і економічність рою ударних БпЛА. Це одна з основних задач для розвитку ройових технологій та їх впровадження у Збройних Силах України.

Зазначені проблемні питання мають ураховуватись під час моделювання усіх відповідних процесів, які відбуваються на кожному з етапів логіко-часової моделі [15], яку представлено у вигляді діаграми Ганта, що описує послідовність зазначених етапів у часі (рис. 1). Слід зазначити, що з точки зору мети бойового застосування рою ударних БпЛА (ураження максимальної кількості об'єктів ГЦ за умови раціонального використання ресурсу рою) найбільш суттєвими є етапи (див. рис. 1, етапи 9–13), які передбачають послідовне вирішення завдань щодо: виявлення та розпізнавання (ідентифікації) цілей заданих класів; вибору алгоритму управління цілерозподілом рою БпЛА; атаки ідентифікованих цілей; оцінки (контролю) результатів ураження цілей.

З урахування цього, на діаграмі Ганта продемонстровано найбільш суттєві етапи застосування рою ударних БпЛА (позначено прямокутником червоного кольору), на яких відбуваються процеси, що потребують першочергової уваги під час математичного моделювання процесів застосування рою ударних БпЛА.

Крім того, виділені на діаграмі Ганта найбільш суттєві етапи відповідають класичній моделі

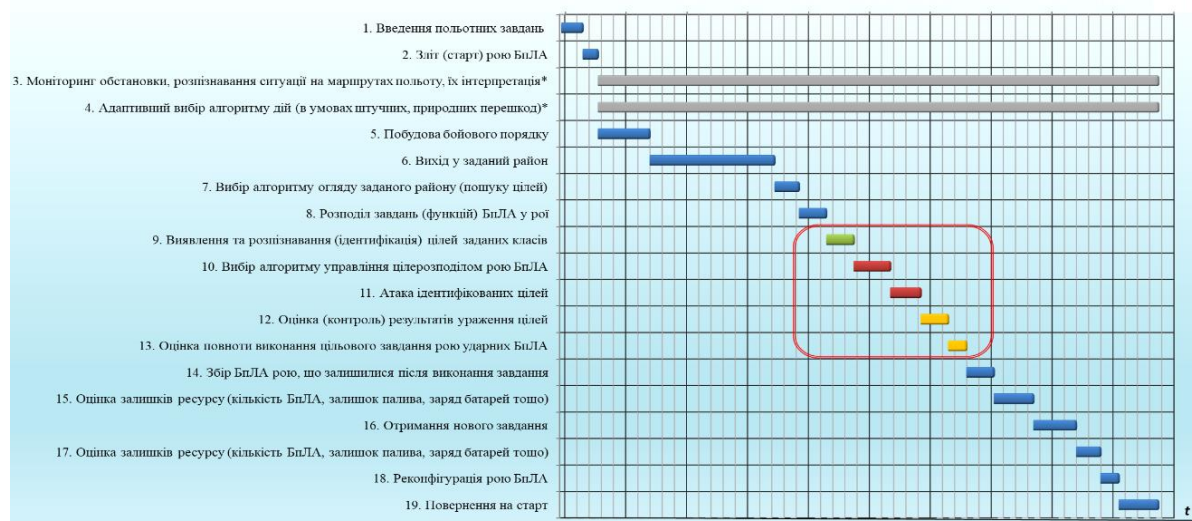
застосування засобів ураження – “розвідка-ураження-оцінка”. Зазначене підкреслює актуальність обраної теми дослідження.

На рис. 1 показано, що етап 9 – етап, пов’язаний з підготовкою рою ударних БПЛА до ураження, що передбачає розв’язання задач кластеризації та класифікації ударних БПЛА та об’єктів групових цілей і потребує розроблення відповідних нейромережових моделей.

Етапи 10 та 11 – безпосередньо пов’язані з

виконанням завдань ураження цілей, що потребує моделювання процесу цілерозподілу рою різнотипних ударних БПЛА для ураження нестационарних ГЦ противника, які можуть містити різнорідні об’єкти.

Етапи 13 та 14 – передбачають оцінювання (контроль) результатів ураження об’єктів ГЦ та оцінювання повноти виконання цільового завдання рою ударних БПЛА), що має бути ураховано у розроблюваних математичних моделях.



Умовні позначення:

- етап виявлення та розпізнавання (ідентифікації) – підготовчий етап
- етапи безпосереднього застосування рою ударних БПЛА для ураження цілей
- етапи, на яких здійснюється оцінка (контроль) результатів ураження цілей та оцінка повноти виконання цільового завдання рою ударних БПЛА

Заходи, позначені сірим кольором, виконуються безперервно протягом усього часу від зльоту до завершення виконання цільового завдання групою (роєм) БПЛА.

Рисунок 1 – Логіко-часова модель застосування рою ударних БПЛА у вигляді діаграми Ганта (варіант)

З урахуванням зазначеного, на рис. 2 представлено розроблену математичну модель застосування рою ударних БПЛА для ураження нестационарних групових цілей із використанням елементів штучного інтелекту.

Математична модель містить 5 взаємопов’язаних модулів: модуль 1 – передбачає формування вхідних даних; модулі 2 та 3 – є нейронними мережами кластеризації та класифікації ударних БПЛА та об’єктів групових цілей; модуль 4 – передбачає формування матриці ефективності ураження j -го класу об’єкта групової цілі i -м класом БПЛА; модуль 5 – є математичною моделлю динамічного цілерозподілу рою різнотипних ударних БПЛА по об’єктах нестационарних групових цілей з урахуванням їх пріоритетності.

Розглянемо більш детально складові розробленої математичної моделі, яка поєднує оптимізаційні методи та елементи штучного інтелекту.

У модулі 1 представлено вхідні дані, обмеження та припущення.

Завдання рою ударних БПЛА: ураження різнорідних об’єктів групової цілі ГЦ. Для досягнення максимального збитку ГЦ необхідно раціонально розподілити ударні БПЛА.

Вхідні дані для кластеризації та класифікації ударних БПЛА та об’єктів ГЦ: $\vec{p}$ – вектор характеристик ударних БПЛА; $\vec{y}$ – вектор розподілу ударних БПЛА за класами; $\vec{d}$ – вектор характеристик об’єктів ГЦ; k_{cl} – кількість кластерів ударних БПЛА, K – кількість кластерів об’єктів ГЦ; $\vec{z}$ – вектор розподілу об’єктів ГЦ за класами; f_1, f_2 – функції активації для нейронів у прихованому та вихідному шарах; W, φ – вагові коефіцієнти НМ класифікації ударних БПЛА та об’єктів ГЦ; $\vec{a}, \vec{b}$ – вектори зміщення НМ класифікації об’єктів ГЦ та ударних БПЛА; $k_{БПЛА}, k_{ГЦ}$ – кількість класів БПЛА та об’єктів ГЦ.

Вхідні дані щодо рою ударних БПЛА: i – типи БПЛА; m – кількість типів БПЛА; N_i – кількість БПЛА i -го типу; k – тип суброю БПЛА; m_i – маса бойової частини БПЛА i -го типу; k_b – коефіцієнт втрат БПЛА, які можуть виникати унаслідок вогневої або радіоелектронної протидії противника; m_k – сумарна маса бойових частин (БЧ) БПЛА i -их типів, об’єднаних у субрій k -го типу.

Вхідні дані щодо противника: групові цілі противника, у складі якої є неоднорідні точкові об’єкти, що підлягають ураженню: j – типи об’єктів у складі групової цілі, $j = \overline{1, n}$; n – кількість типів об’єктів; N_{oj} – кількість об’єктів

Таблиця 1

Пріоритети варіантів призначення БпЛА

Варіант	Зміст варіанта пріоритету призначення
V ₁	гарантоване ураження об'єкта j -го типу i -м типом БпЛА (маса БЧ є достатньою для ураження об'єкта ГЦ): $m_i = m_j, i \rightarrow j: \{1 \rightarrow 1, \dots, m \rightarrow n\}$
V ₂	призначення "важких" БпЛА i -их типів на більш "легкий" (більш простий) об'єкт j -го типу ГЦ (маса БЧ значно перевищує масу, потрібну для ураження об'єкта ГЦ): $i \rightarrow j, a, \mu_i > \mu_j$
V ₃	призначення "легкого" БпЛА i -го типу на більш "важкий" об'єкт j -го типу групової цілі (нераціональний варіант, за якого не забезпечується ураження об'єктів ГЦ) $(i \rightarrow j + a, \mu_i < \mu_j)$
V ₄	формування суброїв (забезпечує одночасне призначення декількох "легких" БпЛА i -их типів на більш "важкий" об'єкт j -го типу групової цілі за умови, що сумарна маса бойових частин БпЛА у складі суброю буде достатньою для ураження об'єктів відповідного типу: $(i \rightarrow j + a, a \in \mathbb{N}, \sum_i \mu_i \geq \mu_j)$

На підставі вхідних даних щодо рою ударних БпЛА та потенційних об'єктів ураження формуються дві групи класифікаційних ознак: перша – для кластеризації та класифікації ударних БпЛА (зокрема ураховуються параметри: маса бойової частини – $m_{бч}$, тактичний радіус БпЛА – r), друга – для кластеризації та класифікації об'єктів групових цілей.

Взаємопов'язані задачі кластеризації та класифікації ударних БпЛА та класифікації об'єктів групових цілей розв'язуються з метою встановлення відповідності певних класів ударних БпЛА, які забезпечуватимуть найбільш ефективне ураження певного класу об'єктів ГЦ. Зазначені задачі розв'язуються за допомогою нейронних мереж кластеризації та класифікації ударних БпЛА (модуль 2) та кластеризації та класифікації об'єктів групових цілей (модуль 3).

Нейронна мережа (модуль 2) складається з двох блоків: блок 2.1 – нейронна мережа кластеризації ударних БпЛА; блок 2.2 – нейронна мережа класифікації ударних БпЛА. Обидві НМ дозволяють за вектором характеристик ударних БпЛА $\vec{p}$ здійснити їх розподіл за класами та отримати вектор класів ударних БпЛА – $\vec{j} = (\vec{p}, k_{\text{БпЛА}})$.

Подібним чином у блоках 3.1 та 3.2 (модуль 3), які, відповідно, є нейронними мережами кластеризації та класифікації об'єктів ГЦ, за вектором їх характеристик $\vec{d}$ здійснюється кластеризація та класифікація об'єктів ГЦ з отриманням вектора класів об'єктів ГЦ $\vec{z} = (\vec{d}, k_{\text{ГЦ}})$.

У модулі 4 – на підставі отриманих результатів класифікації БпЛА та об'єктів ГЦ формується матриця ефективності ураження j -го класу об'єкта групової цілі i -м класом БпЛА – $\|P_{ij}(m_i)\| = \|P_{ij}(R, P, V_i, Z)\|$, де $\vec{R}$ – вектор

параметрів рою ударних безпілотних літальних апаратів; P – вектор параметрів групової цілі противника, що підлягає ураженню; V_i – вектор сценаріїв конфлікту "неоднорідний рій ударних БпЛА – різномірні об'єкти групової цілі противника"; Z – вектор параметрів зовнішнього середовища. Зазначена матриця встановлює правила призначення БпЛА на відповідні об'єкти ГЦ.

Модуль 5 – представляє собою математичну модель динамічного цілерозподілу рою різномірних ударних БпЛА по об'єктах нестаціонарних групових цілей з урахуванням їх пріоритетності.

Основа цією математичної моделі складають:

математична модель цілерозподілу рою різномірних ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестаціонарних групових цілей на основі типових оптимізаційних задач (блок 5.1);

нейронна мережа цілерозподілу рою ударних безпілотних літальних апаратів по об'єктах нестаціонарних групових цілей з урахуванням пріоритетності їх елементів (блок 5.3).

У блоці 5.1 на підставі вхідних даних (з модуля 1) визначається потенціал (ресурс) рою (Π); з урахуванням визначених пріоритетів варіантів призначення ударних БпЛА – $V_1 > V_4 > V_2 > V_3$ (табл. 1) розв'язуються задачі первинного, вторинного, третинного цілерозподілу рою ударних БпЛА з перевіркою після кожної ітерації умов переходу до наступного етапу цілерозподілу. При цьому після кожного етапу цілерозподілу здійснюється оцінка залишку ресурсу рою $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$ та кількості неуразених об'єктів групових цілей $\{N_{oj}^{(1)}, N_{oj}^{(2)}, N_{oj}^{(3)}\}$.

У результаті розв'язання задач цілерозподілу розраховуються показники використання ресурсу рою ударних БпЛА та узагальнення результатів цілерозподілу.

Задача цілерозподілу базується на типових постановках "задачі про призначення", її детально викладено у статті [16] з урахуванням обраних пріоритетів призначення.

Розв'язання оптимізаційної задачі у блоці 5.1 для різних k -варіантів вхідних даних дозволяє отримати вихідні параметри математичної моделі для k -варіантів вихідних параметрів – $F_1\{\|X\|, \Delta P, N_{oj}\}_k$, де $\|X\|$ – матриця призначення; ΔP – залишок ресурсу рою ударних БпЛА після трьох ітерацій цілерозподілу; N_{oj} – залишок неуразених об'єктів j -го типу групової цілі.

Отже, F_1 є результатом цілерозподілу БпЛА, який отримано за допомогою оптимізаційної задачі (блок 5.1).

На підставі отриманих результатів у блоці 5.2 здійснюється формування наборів навчальних даних для нейронної мережі динамічного цілерозподілу рою ударних безпілотних літальних апаратів по об'єктах нестаціонарних групових цілей з урахуванням пріоритетності їх елементів (блок 5.3).

Нейронна мережа (блок 5.3) складається з 8 блоків, у яких на підставі вхідних даних $\vec{u}^* = \langle \vec{K}_u, \vec{K}_{ппо}, \vec{c}, p_{ij}, i, R_{ппо} \rangle$ (блок 5.3.1) та наборів для навчання нейронної мережі $\Delta \vec{u}_n = f(F_1; (\vec{p}, F_2))$ (блок 5.2) отримуються нормовані значення $\vec{u}^* + \Delta \vec{u}_n \rightarrow \vec{u}$ (блок 5.3.2).

У блоці 5.3.3 здійснюється навчання нейронної мережі за алгоритм Левенберга-Марквардта:

$$E(\xi) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (\rho^H - f(\vec{u}_n, \xi_i))^2 \rightarrow \{\xi^{(1)}, \xi^{(2)}, \vec{c}^{(1)}, \vec{c}^{(2)}\}$$

Для цього з урахуванням вибраних у блоках 5.3.5 та 5.3.7 функцій активації нейронів – $f_1 = ReLU(u)$ та $f_2 = \ln(u)$ у блоках 5.3.4 та 5.3.6 здійснюється розрахунок значень на виходах прихованого $\vec{p}^{(1)} = f_1(\xi^{(1)} \vec{u} + \vec{c}^{(1)})$ та вихідного шарів $\vec{p}^{(2)} = f_2(\xi^{(2)} \vec{p}^{(1)} + \vec{c}^{(2)})$ нейронної мережі, де $\xi^{(1)}, \xi^{(2)}$ – коефіцієнти НМ, $\vec{c}^{(1)}, \vec{c}^{(2)}$ – вектори зміщення на виходах прихованого та вихідного шарів НМ.

З урахуванням зазначеного у блоці 5.3.8. визначаються варіанти призначень БПЛА на об'єкти групової цілі:

$$\vec{p} \rightarrow (\vec{p}_1^{(2)}, \vec{p}_2^{(2)}, \dots, \vec{p}_{n-1}^{(2)}, \vec{p}_n^{(2)}),$$

$$\rho_*^{(2)} = f(\vec{K}_u, \vec{K}_{ппо}, \vec{c}, p_{ij}, i, R_{ппо}),$$

$$\vec{p} \rightarrow \{x_{ij}^{(1)}, x_{ij}^{(2)}, \dots, x_{ij}^{(n-1)}, x_{ij}^{(n)}\} \rightarrow F_2$$

Де F_2 – є результатом цілерозподілу БПЛА отриманий за допомогою нейронної мережі (блок 5.3).

У блоці 5.4 порівнюються результати розв'язання задачі цілерозподілу, отримані у блоках 5.1 та 5.3, зокрема значення цільових функцій F_1 та F_2 .

Залежно від результатів перевірки умови $\|F_2 - F_1\| \leq \varepsilon$ приймається рішення, по-перше, яка з двох моделей цілерозподілу (“алгоритмічна” модель або “нейромережева модель”) здійснює цілерозподіл оптимально, по-друге, яку з цих моделей брати за основу для формування рекомендацій щодо підвищення ефективності застосування рою ударних БПЛА для ураження нестаціонарних ГЦ.

Якщо виконується умова $\|F_2 - F_1\| \leq \varepsilon$, де – ε критерій оптимальності цілерозподілу, тоді використовуються результати цілерозподілу, отримані за допомогою нейронної мережі у блоці 5.3. Зазначимо, що у найпростішому варіанті значення критерію оптимальності цілерозподілу можна прийняти близьким до нуля ($\varepsilon \rightarrow 0$), що свідчить про достатню навченість нейронної мережі.

Якщо $\|F_2 - F_1\| > \varepsilon$ – використовуються результати цілерозподілу, отримані за допомогою математичної моделі на основі оптимізаційної задачі (блок 5.1) та приймається рішення про донавчання нейронної мережі (блок 5.5), для чого у блоці 5.2 здійснюється уточнення наборів навчальних даних. Навчання НМ цілерозподілу

рою ударних БПЛА по об'єктах ГЦ з урахуванням їх пріоритетності завершується за виконання умови, зазначеної у блоці 5.4.

Результати, отримані за допомогою розробленої математичної моделі, яка поєднує два взаємопов'язані способи розв'язання задачі динамічного цілерозподілу рою ударних БПЛА (на основі типових оптимізаційних задач та навченої нейронної мережі), використовуються для формування рекомендацій щодо бойового застосування рою ударних БПЛА для ураження нестаціонарних ГЦ.

Таким чином, розроблена математична модель застосування рою ударних БПЛА для ураження нестаціонарних ГЦ із використанням елементів штучного інтелекту дозволяє сформувати рекомендації щодо застосування роїв ударних БПЛА для ураження нестаціонарних ГЦ.

Новизна математичної моделі полягає в тому, що: застосування рою ударних БПЛА моделюється як комплекс пов'язаних процесів:

1) кластеризації та класифікації ударних БПЛА та об'єктів ГЦ, що дозволяє сформувати матрицю ефективності ураження об'єктів ГЦ певним класом БПЛА, яка надалі враховується в процесі розподілу ресурсу рою ударних БПЛА;

2) динамічного цілерозподілу рою різнотипних ударних БПЛА по об'єктах нестаціонарних ГЦ з урахуванням їх пріоритетності на основі типових оптимізаційних задач та навченої нейронної мережі, за якого забезпечується максимальний збиток ГЦ з урахуванням пріоритетів ураження об'єктів ГЦ, прикриття їх засобами ППО, імовірності їх ураження та досяжності для ударних БПЛА рою.

При цьому математична модель цілерозподілу різнотипних ударних БПЛА для ураження нестаціонарних ГЦ на основі типових оптимізаційних задач базується на класичних постановках оптимізаційних задач розподілу неоднорідних ресурсів, зокрема на ітераційних процедурах “задачі про призначення” з урахуванням запропонованих пріоритетів варіантів призначення ударних БПЛА на об'єкти ГЦ, та обмежень на призначення БПЛА (за масою їх БЧ), що дає змогу: 1) раціонально використати ресурс рою ударних БПЛА; 2) сформувати на основі методів комбінаторного аналізу варіантів суброїв ударних БПЛА для ураження складних об'єктів, що забезпечить додаткове цільове використання ресурсу рою ударних БПЛА та ураження максимальної кількості об'єктів ГЦ.

Крім того, зазначена математична модель на основі оптимізаційних задач використовується для формування наборів навчальних даних нейронної мережі цілерозподілу рою ударних БПЛА по об'єктах нестаціонарних ГЦ з урахуванням їх пріоритетності, а також може бути використана при малих розмірностях задачі цілерозподілу.

Отже, розроблена математична модель застосування рою ударних БПЛА для ураження нестаціонарних ГЦ із використанням елементів штучного інтелекту дозволяє описувати найбільш

суттєві процеси застосування рою ударних БпЛА під час автономного застосування роїв ударних БпЛА, коли завдання вирішуються в умовах критичного часу та без участі оператора.

Обговорення

Отримані результати підтверджують актуальність проблеми математичного опису процесів застосування роїв ударних БпЛА, а також доцільність поєднання методів цілерозподілу ударних БпЛА на основі оптимізаційних задач та навчених нейронних мереж, що дозволяє завдяки адаптації до швидкозмінних умов обстановки вирішувати завдання динамічного цілерозподілу неоднорідних роїв ударних БпЛА по різномірних об'єктах нестационарних ГЦ.

У попередніх дослідженнях цілерозподіл переважно розглядався як задача оптимізації для фіксованих параметрів групи та об'єктів групової цілі, за умов, коли один БпЛА призначається на лише одну ціль. Проте в реальних умовах бойової обстановки склад рою БпЛА та об'єктів групових цілей можуть змінюватися в масштабі реального часу. Розроблена математична модель дає можливість урахувати такі динамічні зміни та формувати варіанти призначень різномірних ударних БпЛА на різномірні об'єкти нестационарних ГЦ.

При цьому матриця ефективності ураження об'єктів ГЦ певними типами БпЛА, яка формується на основі розв'язання задач кластеризації та класифікації ударних БпЛА і об'єктів групової цілі, дозволяє завдяки введенню “обмежень на призначення” скоротити час підготовки рою ударних БпЛА до бойового застосування для ураження об'єктів групових цілей противника.

Підкреслимо, що розроблена у *блоці 5.1.* математична модель дає змогу алгоритмічно розв'язати задачу оптимального цілерозподілу рою різномірних ударних БпЛА по об'єктах нестационарної групової цілі противника та забезпечує ураження максимальної кількості об'єктів ГЦ з раціональним використанням ресурсу рою (сумарної маси бойових частин ударних БпЛА). Математична модель враховує чотири основні сценарії несиметричного конфлікту “неоднорідний рій БпЛА – різномірні об'єкти групової цілі противника” та їх пріоритетність

$$V_1 > V_4 > V_2 > V_3.$$

Розроблена у *блоці 5.3.* нейронна мережа цілерозподілу враховує: пріоритети ураження об'єктів групових цілей, їх прикриття засобами ППО, імовірності їх ураження та досяжність для ударних БпЛА рою. Слід зазначити, що використання “нейромережевої моделі” є доцільним за умов: значної розмірності задачі цілерозподілу, коли оптимізаційна задача не дозволяє оперативно отримати результати цілерозподілу, що зумовлено різким зростанням кількості обчислювальних процедур; неповноти вхідних даних про об'єкти ГЦ противника в умовах невизначеності.

Висновки

Отже, у статті розроблено математичну модель застосування рою ударних БпЛА для ураження нестационарних групових цілей із використанням штучного інтелекту, яка поєднує: нейронні мережі кластеризації та класифікації ударних БпЛА і об'єктів групових цілей, на основі яких отримується матриця ефективності ураження об'єктів ГЦ певним класом ударних БпЛА; математичну модель динамічного цілерозподілу рою різномірних ударних БпЛА по об'єктах нестационарних ГЦ з урахуванням їх пріоритетності, яка включає дві взаємопов'язані математичні моделі – на основі оптимізаційних задач та навченої нейронної мережі.

Показано, що поєднання алгоритмічних та нейромережевих підходів дозволяє розв'язувати задачу цілерозподілу рою різномірних ударних БпЛА по різномірних об'єктах нестационарної ГЦ у реальному масштабі часу з урахуванням зміни складу групової цілі та рою ударних БпЛА.

Розроблена математична модель дає можливість визначати показники використання ресурсу рою ударних БпЛА та результатів цілерозподілу (матриця призначення ударних БпЛА, кількість неуразених об'єктів ГЦ), що є основою для формування рекомендацій щодо застосування роїв ударних БпЛА для ураження нестационарних ГЦ.

Подальшими напрямками досліджень можуть бути побудова алгоритмів оптимального цілерозподілу рою ударних БпЛА для ураження нестационарних ГЦ, розроблення математичних моделей формування суброїв ударних БпЛА на основі поєднання оптимізаційних та комбінаторних задач, обґрунтування критеріїв оптимальності цілерозподілу та рекомендацій щодо підвищення ефективності застосування роїв ударних БпЛА, порівняння інших постановок оптимізаційних задач розподілу неоднорідних ресурсів з метою формування додаткових наборів даних для навчання нейронної мережі цілерозподілу.

Матеріали, представлені у статті, можуть бути корисними для службових осіб органів управління Сил безпілотної системи Збройних Сил України, наукових та науково-педагогічних працівників, які проводять дослідження у галузі застосування безпілотної системи, математичного моделювання складних систем воєнного призначення, а також здобувачів вищої освіти, 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. Класифікація безпілотної літальної апаратури у складі безпілотної авіаційних комплексів (систем) у ЗС України. Київ: ЦНДІ ЗС України, 2024.
3. Візія Повітряних Сил 2035. Міністерство оборони України. Командування ПС ЗСУ. 2020. 39 с.

4. Стратегія розвитку Повітряних Сил на період до 2035 року: наказ Головнокомандувача Збройних Сил України. Київ: МОУ, КПС ЗСУ, 2020. 36 с.
5. 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)/
6. Горбулін В. П., Мосов С. П. Рої дронів – кульмінація дронізації воєн. Вісн. НАН України. 2024. № 3. С. 3–11.
7. 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>.
8. Голембо В. А., Мельніков Р. Г. Організація роботи групи безпілотної літальних апаратів. Львів: Нац. ун-т “Львівська політехніка”, 2018. С. 53–63.
9. Журавська І. М. Синтез маршрутів суброїв безпілотної авіації з використанням нейронної мережі Хопфілда для обстеження територій. Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2017. № 3. С. 86–94.
10. Бережний А. О. Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотної літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об’єктів. Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Харків: ХНУПС, 2020. 192 с.
11. Житецький Л. С. Методи управління і оцінювання в умовах невизначеності. Проблеми керування та інформатики. 2023. № 5. С. 47–63.
12. Компанієць О. М., Ключніков І. М., Дмитрієв А. Г. Комплексний аналіз впливу факторів на ефективність управління роями безпілотної літальних апаратів. Системи озброєння і військова техніка. 2023. № 3 (75). С. 66–70.
13. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні. Розпорядження КМУ України від 02.12.2020 № 1556-р. Ред. від 29.12.2021, підстава – 1787-2021-р. URL: <http://surl.li/lhdyf>.
14. Шовкошитний І. І., Василенко О. А. Проблемні питання ройового застосування ударних безпілотної літальних апаратів. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2024. № 3 (48). С. 27–34. DOI:10.33099/2311-7249/2023-48-3-27-34.
15. Шовкошитний І. І., Василенко О. А. 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 Національного університету оборони України. 2024. № 3 (83). С. 108–116.
16. Шовкошитний І. І., Василенко О. А. Метод динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних безпілотної літальних апаратів на основі ітераційних процедур “задачі про призначення”. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2025. № 2 (53). С. 138–149. DOI:10.33099/2311-7249/2025-53-2-138-149.

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

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

²Olha Vasylenko

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

¹The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

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

MATHEMATICAL MODEL OF THE USE OF A SWARM OF STRIKE UNMANNED AERIAL VEHICLES TO ENGAGE NON-STATIONARY GROUP TARGETS USING ELEMENTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The article develops a mathematical model for the use of a swarm of strike unmanned aerial vehicles to engage non-stationary group targets of the enemy using elements of artificial intelligence, which, according to the presented Gantt chart, allows for the mathematical formalization of the most significant stages of the use of a swarm of strike unmanned aerial vehicles (detection and recognition (identification) of targets of specified classes; selection of an algorithm for controlling the target distribution of a swarm of strike unmanned aerial vehicles; attack on identified targets; evaluation (control) of the results of target destruction). The mathematical model combines: neural networks for clustering and classification of strike unmanned aerial vehicles and group target objects, on the basis of which a matrix of the effectiveness of striking group target objects with a certain class of strike unmanned aerial vehicles is obtained; a mathematical model of dynamic target distribution of a swarm of different types of strike unmanned aerial vehicles among non-stationary group targets, taking into account their priority, which includes two interrelated mathematical models – based on optimization tasks and a trained neural network.

It has been shown that the combination of algorithmic and neural network approaches allows solving the problem of target distribution of a swarm of strike unmanned aerial vehicles on heterogeneous objects of a non-stationary group target in real time, taking into account changes in the composition of the group target and the swarm of strike unmanned aerial vehicles. At the same time, the mathematical model of target distribution of a swarm of strike unmanned aerial vehicles for striking non-stationary group targets based on optimization problems allows obtaining data sets for training a neural network of target distribution, which is used in the following cases: a significant task dimension, when the optimization task does not allow for the

rapid obtaining of target distribution results; incompleteness of input data on enemy group targets in conditions of uncertainty.

In addition, the developed mathematical model takes into account: the main scenarios of asymmetric conflict “heterogeneous swarm of unmanned aerial vehicles – heterogeneous enemy group target objects” and the priority of assignment options; the priorities for striking group target objects, their coverage by air defense systems, the probability of their destruction, and their reachability for strike unmanned aerial vehicles in the swarm.

Key words: mathematical model, application of a swarm of strike unmanned aerial vehicles, neural network, strike efficiency, non-stationary group target, dynamic target distribution, optimisation, clustering, classification, artificial intelligence, swarm resource, strike priorities, assignment options.

References

1. Pro rishennia RNBO vid 20 serpnia 2021 roku “Pro Stratehichniy oboronnyi biuletyn 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. Klasyfikatsiia bezpilotnykh litalnykh aparativ u skladi bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv (system) u ZS Ukrainy. Kyiv: TsNDI ZS Ukrainy, 2024.
3. Vizitia Povitrianykh Syl 2035. Ministerstvo oborony Ukrainy. Komanduvannia PS ZSU. 2020. 39 s.
4. Stratehiia rozvytku Povitrianykh Syl na period do 2035 roku: nakaz Holovnokomanduvacha Zbroinykh Syl Ukrainy. Kyiv: MOU, KPS ZSU, 2020. 36 s.
5. 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)
6. Horbulin V. P., Mosov S. P. Roi droniv – kulminatsiia dronizatsii voien. Visn. NAN Ukrainy. 2024. № 3. S. 3–11.
7. Martyniuk O. R., Medvediev V. K. Pidkhid do formuvannia 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>.
8. Holembo V. A., Melnikov R. H. Orhanizatsiia roboty hrupy bezpilotnykh litalnykh aparativ. Lviv: Nats. un-t “Lvivska politekhnika”, 2018. S. 53–63.
9. Zhuravska I. M. Syntez marshrutiv subroiv bezpilotnykh aparativ z vykorystanniam neironnoi merezhi Khopfilda dlia obstezhennia terytorii. Radioelektronika, informatyka, upravlinnia. 2017. № 3. S. 86–94.
10. Berezhnyi A. O. Metody ta informatsiina tekhnolohiia avtomatyzovanoho planuvannia marshrutiv polotiv bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia pidvyshchennia efektyvnosti poshuku obektiv. Dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.06. Kharkiv: KhNUPS, 2020. 192 s.
11. Zhytetskyi L. S. Metody upravlinnia i otsiniuvannia v umovakh nevyznachenosti. Problemy keruvannia ta informatyky. 2023. № 5. S. 47–63.
12. Kompaniets O. M., Kliushnikov I. M., Dmytriiev A. H. Kompleksnyi analiz vplyvu faktoriv na efektyvnist upravlinnia roiamy bezpilotnykh litalnykh aparativ. Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. 2023. № 3 (75). C. 66–70.
13. Pro skhvalennia Kontseptsii rozvytku shtuchnoho intelektu v Ukraini. Rozporiadzhennia KM Ukrainy vid 02.12.2020 № 1556-r. Red. vid 29.12.2021, pidstava –1787-2021-r. URL: <http://surl.li/ldyyf>.
14. Shovkoshytnyi I. I., Vasylenko O. A. Problemni pytannia roiovoho zastosuvannia udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ. Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony. 2024. № 3 (48). S. 27–34. DOI:10.33099/2311-7249/2023-48-3-27-34.
15. Shovkoshytnyi I. I., Vasylenko O. A. Rozroblennia lohiko-chasovoi modeli roiovoho zastosuvannia udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ z urakhuvanniam typovykh sposobiv yikh hrupovoho zastosuvannia v suchasnykh umovakh. Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy. 2024. № 3 (83). S. 108–116.
16. Shovkoshytnyi I. I., Vasylenko O. A. Metod dynamichnoho tsilerozpodilu neodnorodnoho roiu udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ na osnovi iteratsiinykh protsedur “zadachi pro pryznachennia”. Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony. 2025. № 2 (53). S. 138–149. DOI:10.33099/2311-7249/2025-53-2-138-149.