

ШОВКОШИТНИЙ Ігор Іванович,

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,

Центр військово-стратегічних досліджень Національного університету оборони України, Київ, Україна,

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

ВАСИЛЕНКО Ольга Анатоліївна,

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

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

УПРАВЛІННЯ ЦІЛЕРОЗПОДІЛОМ РОЮ РІЗНОТИПНИХ УДАРНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ УРАЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ГРУПОВИХ ЦІЛЕЙ НА ОСНОВІ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМУ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА ЕЛЕМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

***Метою статті** є розроблення адаптивного алгоритму управління цілерозподілом рою різнотипних ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей з використанням елементів штучного інтелекту та формування рекомендацій щодо підвищення ефективності застосування роїв таких апаратів за рахунок адаптивного управління його цілерозподілом.*

***Методи дослідження.** Під час написання статті застосовано: загальнонаукові методи (аналізу, порівняння), методи математичної логіки, методи аналітичного моделювання для формалізації задачі цілерозподілу, методи оптимізації (зокрема, цілочисельного програмування), методи штучного інтелекту (зокрема, машинного навчання – Machine Learning), а також методи імітаційного моделювання для оцінювання ефективності алгоритму в умовах змінної обстановки.*

***Отримані результати дослідження.** Розроблено адаптивний алгоритм управління цілерозподілом рою ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей з використанням елементів штучного інтелекту, який дає змогу розв'язати задачу цілерозподілу неоднорідних роїв ударних безпілотних літальних апаратів по різнорідних об'єктах групової цілі противника в умовах, коли інформація щодо стану рою таких апаратів та стану групової цілі є неповною. За таких умов задача цілерозподілу розв'язується комплексно із застосуванням двох способів: евристичного оптимізаційного методу та з використанням навченої нейронної мережі. Використання такої мережі дасть змогу отримати раціональні варіанти цілерозподілу рою ударних безпілотних літальних апаратів по нестационарних групових цілях, які в умовах неповної входної інформації, часткової втрати безпілотних літальних апаратів рою будуть забезпечувати прийнятні результати цілерозподілу в межах наявного ресурсу. Імітаційним моделюванням перевірена працездатність алгоритму і його адекватна реакція на зміну параметрів рою та групових цілей у реальному часі відповідно до обраних критеріїв. Наведено рекомендації щодо: підвищення ефективності застосування роїв ударних безпілотних літальних апаратів за рахунок адаптивного управління цілерозподілом рою ударних таких апаратів; особливостей програмної реалізації запропонованого алгоритму.*

***Елементом наукової новизни** є те, що адаптивний алгоритм управління цілерозподілом рою ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей з використанням елементів штучного інтелекту полягає у комплексному застосуванні двох способів розв'язання задачі цілерозподілу (на основі типових оптимізаційних задач розподілу неоднорідних ресурсів та з використанням навченої нейронної мережі), вибір яких здійснюється адаптивно залежно від критеріїв наявного (припустимого) часу та розмірності задачі цілерозподілу. Крім того, алгоритм дає змогу врахувати пріоритети ураження об'єктів групових цілей, прикриття їх засобами протиповітряної оборони, імовірність їх ураження та їхню досяжність, завдяки чому забезпечується максимальний збиток нестационарній груповій цілі за раціонального використання ресурсу рою ударних безпілотних літальних апаратів.*

***Теоретична та практична значущість статті.** Адаптивний алгоритм управління цілерозподілом рою ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей з використанням елементів штучного інтелекту може бути застосовано під час розроблення програмних модулів управління цілерозподілом неоднорідних роїв таких апаратів із виявлення та ураження різнорідних об'єктів. Алгоритм і рекомендації щодо його застосування можуть бути реалізовані у системах прийняття рішень (щодо планування застосування та безпосереднього застосування роїв безпілотних літальних апаратів) та в системах бойового управління (автономних системах управління роєм безпілотних літальних апаратів й інших керованих авіаційних засобах ураження), у яких цілерозподіл здійснюється в реальному часі.*

Ключові слова: ударні безпілотні літальні апарати, математична модель, метод динамічного цілерозподілу, управління цілерозподілом, рій ударних безпілотних літальних апаратів, адаптивний алгоритм, нейронна мережа, ураження нестационарних групових цілей, ефективність застосування, аналітичне моделювання, імітаційне моделювання.

Вступ

З початку широкомасштабної війни російської федерації проти України важливого значення набув розвиток безпілотних авіаційних апаратів (далі – БпЛА), характерною рисою якого є їх масове застосування обома сторонами [1]. Ця тенденція обумовлює необхідність проведення досліджень, що пов'язані зі змінами форм і способів застосування підрозділів безпілотних систем Збройних Сил України, особливо в умовах упровадження перспективних ройових принципів спільного використання ударних БпЛА та інших керованих авіаційних засобів ураження. Задача цілерозподілу різнотипних ударних БпЛА для ураження нестационарних групових цілей противника може розв'язуватися за допомогою типових оптимізаційних задач або методами штучного інтелекту (розроблення нейронних мереж) [2; 3], постановки яких можуть змінюватись залежно від умов задачі та низки обмежень.

Постановка проблеми. Нині особливої ваги набуває проблема здійснення ефективного цілерозподілу ударних БпЛА для ураження об'єктів противника. У випадку застосування неоднорідного рою БпЛА ця проблема зводиться до розв'язання задачі призначення кожному БпЛА рою конкретної цілі в умовах динамічної зміни обстановки, пріоритетності ураження цілей та доступних залишків ресурсу (кількості БпЛА, запасу пального (заряду батарей), боєприпасів тощо) [4]. Також слід враховувати, що в бойових умовах досить складним завданням є ураження групових цілей, які відрізняються достатнім рівнем адаптивності та живучості в умовах радіоелектронно-вогневого впливу. Отже, виникає потреба в оперативному здійсненні цілерозподілу неоднорідного рою БпЛА по різнорідних об'єктах групової цілі противника, з урахуванням змін обстановки, пріоритетності цілей та залишків ресурсу рою [5].

З огляду на високу динаміку бойових дій, стандартні статичні підходи до задачі цілерозподілу можуть бути неефективними. Це вимагає створення нових алгоритмів управління цілерозподілом ударних БпЛА, що враховують зміни в обстановці, можливі втрати БпЛА, появу нових цілей та зміну її пріоритетів і просторового положення. Враховуючи зазначене, тематика статті, яку присвячено питанням адаптивного управління цілерозподілом рою різнотипних ударних БпЛА для ураження групових цілей, потребує поглибленого дослідження. Отже, актуальним науковим завданням є розроблення адаптивного алгоритму управління цілерозподілом рою ударних БпЛА з використанням евристичного оптимізаційного методу та елементів штучного інтелекту для ураження нестационарних групових цілей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Математична формалізація будь-якої задачі

передбачає знання об'єкта дослідження для можливості побудови його адекватної моделі або моделі його функціонування. Останнім часом багато публікацій у фахових виданнях присвячено дослідженням таких об'єктів, як «рій БпЛА», та моделі процесів їх застосування [6–8]. Зокрема, питання «роїв» як перспективного способу групового застосування роботизованих безпілотних систем досліджувалась у роботах [5]. Доволі системно проблеми застосування роїв ударних БпЛА розглянуто у [9], де на підставі логічних висновків розроблено логіко-часову модель, у якій виокремлюються етапи адаптивного вибору алгоритмів дій БпЛА в різних умовах, розподілу функцій між окремими агентами рою, розпізнавання цілей, вибору варіантів їхньої атаки, контролю результатів ураження та реконфігурації рою. Окремо виділено проблему цілерозподілу роїв БпЛА, яка з точки зору мети рою (ураження об'єктів) є головною. Продовження дослідження проблематики ройового застосування БпЛА здійснено авторами у публікації [10], де згадана вище логіко-часова модель була деталізована з урахуванням типових способів групового застосування БпЛА в сучасних умовах.

Також нині активно проводяться дослідження в галузі управління групами (роями) БпЛА, пропонуються різні підходи до вирішення проблем їхньої координації та автономності. Зокрема, методологічні основи синтезу системи управління групою (роєм) БпЛА розглянуто в [11]. Проте автори наголошують, що запропоновані методологічні основи та підходи лише сприятимуть створенню алгоритмів управління для організації функціонування роїв БпЛА під час виконання ними відповідних завдань. Рій ударних БпЛА розглядається як функціональна підсистема, цільовою функцією управління якою пропонується вважати максимальну ймовірність виконання місії або максимальну кількість знищених цілей. Конкретних постановок задач або алгоритмів управління цілерозподілом у [11] не наведено. Проте, торкаючись проблеми вибору моделей управління для групи (рою) БпЛА, автори акцентують увагу на тому, що нині стають популярними гібридні мультиагентні рішення із використанням як традиційних методів, так і методів з елементами штучного інтелекту. З погляду задачі цілерозподілу рою БпЛА по об'єктах для їх ураження інтерес становить клас моделей розподілу завдань (Task Allocation Models) [11], які здатні реалізувати оптимальну постановку завдань ударним БпЛА для збільшення загальної продуктивності групи (рою). До них належать:

оптимізаційні моделі (Optimization-Based Models), що використовують лінійне цілочисельне програмування для пошуку оптимальних завдань конкретним БпЛА з урахуванням обмежень. Недоліком таких моделей є

складність обчислення для роїв з великою кількістю БпЛА;

евристичні та метаверистичні моделі (Heuristic and Metaheuristic Models) та модифікації жадібного алгоритму, які використовуються, коли точне розв'язання задачі оптимізації доволі складне або займає багато часу. У таких моделях і алгоритмах передбачається, що на кожному кроці вибирається найкраще доступне рішення, без прогнозування подальших дій. Інтерес до використання таких алгоритмів зумовлений їхньою незначною обчислювальною складністю, можливістю отримання рішень, наближених до оптимальних, а також можливістю реалізації в адаптивних алгоритмах розподілу ресурсів на основі ройового (штучного) інтелекту.

Отже, розв'язання задачі цілерозподілу роїв ударних БпЛА може базуватись на поєднанні оптимізаційних математичних моделей (методів) та метаверистичних математичних моделей із використанням елементів штучного інтелекту. Зазначену ідею частково реалізовано у [5], де викладено метод, що дає змогу розв'язати задачу цілерозподілу неоднорідних роїв ударних БпЛА по різномірних об'єктах групової цілі противника завдяки: використанню ітераційних процедур "задачі про призначення" з послідовним використанням запропонованих варіантів призначення неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів на різномірні об'єкти відповідно до пріоритетів зазначених варіантів; здійсненню розподілу ударних безпілотних літальних апаратів по об'єктах за умов несиметричного конфлікту «неоднорідний рій безпілотних літальних апаратів – різномірні об'єкти противника»). Також у [5] проведено формалізацію задачі, запропоновано узагальнену схему методу динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних БпЛА й показано його працездатність. Проте оптимізаційний підхід на основі типових математичних постановок задач дає змогу оперативно отримувати раціональні результати у ситуаціях, коли розмірність задачі є умовно невеликою, а цілі (об'єкти дії) – стаціонарними. В умовах зростання розмірності задачі (збільшення кількості БпЛА у рою та об'єктів у складі групової цілі), а також динамічної зміни їхнього взаємного положення, оптимізаційні моделі на основі лінійного цілочисельного програмування через зростання кількості обчислювальних процедур, не дозволятимуть здійснювати цілерозподіл у реальному часі. Це потребує пошуку нових (гібридних) рішень, які б задовольняли вимогам раціональності результатів цілерозподілу рою ударних БпЛА та оперативності їх отримання.

Одним із перспективних напрямів розв'язання задачі цілерозподілу неоднорідних ресурсів є нейронні мережі за умови певної адаптації задачі, підготовки необхідних вхідних даних, правильного підбору архітектури нейронної мережі, вибору алгоритмів для їхнього навчання для забезпечення можливості отримання адекватних результатів цілерозподілу.

Метою статті є розроблення адаптивного алгоритму управління цілерозподілом рою ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей із використанням елементів штучного інтелекту та формування рекомендацій щодо підвищення ефективності застосування роїв ударних таких апаратів за рахунок адаптивного управління його цілерозподілом.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для кращого розуміння викладених нижче результатів дослідження матеріалу статті введемо такі базові положення:

1. Авторами запропоновано основні терміни, які використовуються в цій публікації:

«*неоднорідний рій ударних БпЛА*» – сукупність БпЛА ударного типу, які діють у складі рою, але відрізняються між собою за головними характеристиками (тип озброєння, злітна маса, маса бойової частини, тактичний радіус, швидкість і висота польоту, рівень автономності, функціональні можливості, кількість можливих застосувань;

«*ройова взаємодія БпЛА*» – форма функціонування групи автономних або напівавтономних БпЛА, у якій окремі апарати координують свої дії між собою без централізованого управління або з мінімальним втручанням оператора, використовуючи принципи самоорганізації структури рою, обміну інформацією та розподілу функцій у масштабі часу, наближеному до реального, для досягнення спільної мети;

«*групово нестационарна ціль*» – сукупність однорідних та різномірних об'єктів, які змінюють своє положення у просторі та часі під час виконання бойового завдання та підлягають ураженню.

2. Головні чинники, що впливають на процес управління цілерозподілом (далі – ЦР). У бойових умовах, коли визначальним чинником є спроможність діяти оперативно з урахуванням мінливої обстановки., Процес управління цілерозподілом рою ударних БпЛА має бути адаптивним залежно від застосовуваних БпЛА (їхніх типів, швидкості та цільового навантаження), наявного часу на прийняття рішень T_0 , який, своєю чергою, залежить від:

розмірності задачі Q (співвідношення кількості БпЛА у рою та потенційних об'єктів ураження у складі групової цілі (далі – ГЦ);

взаємного положення БпЛА рою та потенційних об'єктів ураження ГЦ, що впливає на потенційний час підльоту до конкретного об'єкта ГЦ.

3. В основу адаптивного алгоритму управління ЦР покладено положення методу динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних БпЛА на основі ітераційних процедур «задачі про призначення» [5], а також алгоритм з елементами штучного інтелекту (з використанням нейронної мережі цілерозподілу, натренованої на навчальних та контрольних вибірках даних щодо розподілу БпЛА по об'єктах групової цілі).

Водночас, в основу методу динамічного

цілерозподілу покладено математичну модель динамічного цілерозподілу рою різнотипних ударних БпЛА по об'єктах нестаціонарних ГЦ з урахуванням їх пріоритетності, складовими якої є: математична модель цілерозподілу рою різнотипних ударних БпЛА для ураження нестаціонарних ГЦ на основі типових оптимізаційних задач та математична модель нейронної мережі цілерозподілу рою ударних БпЛА по об'єктах нестаціонарних ГЦ з урахуванням їх пріоритетності.

4. З урахуванням наведеного вище, адаптивність алгоритму цілерозподілу полягає у комбінованому застосуванні типових оптимізаційних моделей та нейромережевої моделі цілерозподілу з можливістю вибору одного зі способів розв'язання задачі цілерозподілу рою різнотипних ударних БпЛА по об'єктах нестаціонарних групових цілей, залежно від умов обстановки (припустимого часу на здійснення цілерозподілу та розмірності задачі).

5. Під час розроблення алгоритму враховано основні вимоги та правила побудови алгоритмів, що до них висуваються. Передусім алгоритм управління цілерозподілом ударних БпЛА має бути адаптивним, логічно структурованим, практично виконуваним та враховувати зміни в обстановці, втрати (витрати) БпЛА, а також забезпечувати ефективний розподіл ресурсів неоднорідного рою ударних БпЛА у симетричних та несиметричних варіантах конфлікту.

Розглянемо структуру та зміст адаптивного алгоритму управління цілерозподілом рою ударних БпЛА для ураження нестаціонарних групових цілей із використанням елементів штучного інтелекту, блок-схему якого представлено на рис. 1. Алгоритм призначено для опису процесу управління застосуванням рою різнотипних ударних БпЛА для ураження нестаціонарних ГЦ. Вхідними даними алгоритму є:

1. Дані щодо рою ударних БпЛА: $[i] = \{i, m_i, N_i, m_i\}$, $i = \overline{1, m}$, де i – тип БпЛА; m – кількість типів БпЛА; N_i – кількість БпЛА i -го типу; m_i – маса бойової частини БпЛА i -го типу; k_b – коефіцієнт втрат БпЛА, які можуть виникати внаслідок вогневої або радіоелектронної протидії противника.

2. Дані щодо противника: $[j] = \{j, n, m_{oj}, N_{oj}\}$, $j = \overline{1, n}$ – параметри ГЦ противника, у складі якої є неоднорідні точкові об'єкти, що підлягають ураженню: j – типи об'єктів у складі ГЦ, $j = \overline{1, n}$; n – кількість типів об'єктів; N_{oj} – кількість об'єктів ураження j -го типу у складі ГЦ; m_{oj} – мінімальна маса БЧ, достатня для ураження об'єкта j -го типу.

3. Матриця ефективності ураження об'єкта j -го класу у складі ГЦ i -м класом БпЛА $\|P_{ij}(m_i)\|$, яка встановлює залежність імовірностей ураження об'єктів ГЦ від мас БЧ ударних БпЛА.

Для формалізації задачі було проведено аналітичне моделювання, що забезпечило побудову математичної

моделі процесу цілерозподілу з урахуванням пріоритетів, обмежень та наявних ресурсів. Відповідно до логіки запропонованого авторами методу динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних БпЛА на основі ітераційних процедур «задачі про призначення» [5] визначається потенціал рою ударних БпЛА (Π), який пов'язаний із сумарною масою БЧ БпЛА i -х типів, що забезпечують ураження відповідних об'єктів ($i \rightarrow j$).

Подальшим кроком є оцінювання розмірності задачі цілерозподілу рою ударних БпЛА по об'єктах ГЦ – $q: \{N_i \times N_{oj}\}$. Водночас, БпЛА i -х типів обираються з урахуванням коефіцієнта втрат k_b :

$$N_i = \sum_i N_i (1 - k_b), \quad \forall i = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Після цього обчислюється значення наявного часу на здійснення цілерозподілу рою ударних БпЛА. Значення цього показника залежить від умовного центру координат рою БпЛА $\bar{\Psi}(x_i, y_i)$, умовного центру координат ГЦ $\bar{\Psi}_{ГЦ}(x_j, y_j)$, швидкостей переміщення у просторі рою ударних БпЛА та нестаціонарної групової цілі ($\bar{V}$ та $\bar{V}_{ГЦ}$). Тобто час для здійснення цілерозподілу можна розглядати як функціонал такого вигляду:

$$t_{up} = f(\bar{V}, \bar{\Psi}, \bar{V}_{ГЦ}, \bar{\Psi}_{ГЦ}). \quad (2)$$

У разі достатнього часу для здійснення цілерозподілу та незначної розмірності задачі, що перевіряється умовами $(t_{up} > T_0) \wedge (N_i \times N_{oj} > Q)$, алгоритм передбачає ітераційне розв'язання задачі цілерозподілу на основі типової оптимізаційної «задачі про призначення» (порядок дій описано у [5] з урахуванням пріоритетів варіантів призначення БпЛА i -го типу для ураження об'єкта j -го типу ($V1 > V4 > V2 > V3$). Зміст зазначених варіантів наведено у табл. 1. За таких умов, після кожної з трьох ітерацій цілерозподілу здійснюється перевірка залишку ресурсу рою ($\Delta \Pi_1, \Delta \Pi_2, \Delta \Pi_3$) і кількості неуразених об'єктів ГЦ ($N_{ij}^{(1)}, N_{ij}^{(2)}, N_{ij}^{(3)}$). За умови $\Delta \Pi_1, N_{oj}^{(1)} > 0$ здійснюється перехід до вторинного цілерозподілу за пріоритетом V4, а за умови $\Delta \Pi_2, N_{oj}^{(2)} > 0$ – до третинного цілерозподілу за пріоритетом V2.

Якщо у результаті третинного цілерозподілу є залишок ресурсу рою ударних БпЛА та певна кількість неуразених об'єктів j -го типу ГЦ, які вже не можуть бути ураженими БпЛА певного типу (тобто виконується умова $\Delta \Pi_3, N_{oj}^{(3)} > 0$), алгоритм передбачає призначення залишків рою ударних БпЛА на виконання іншої задачі.

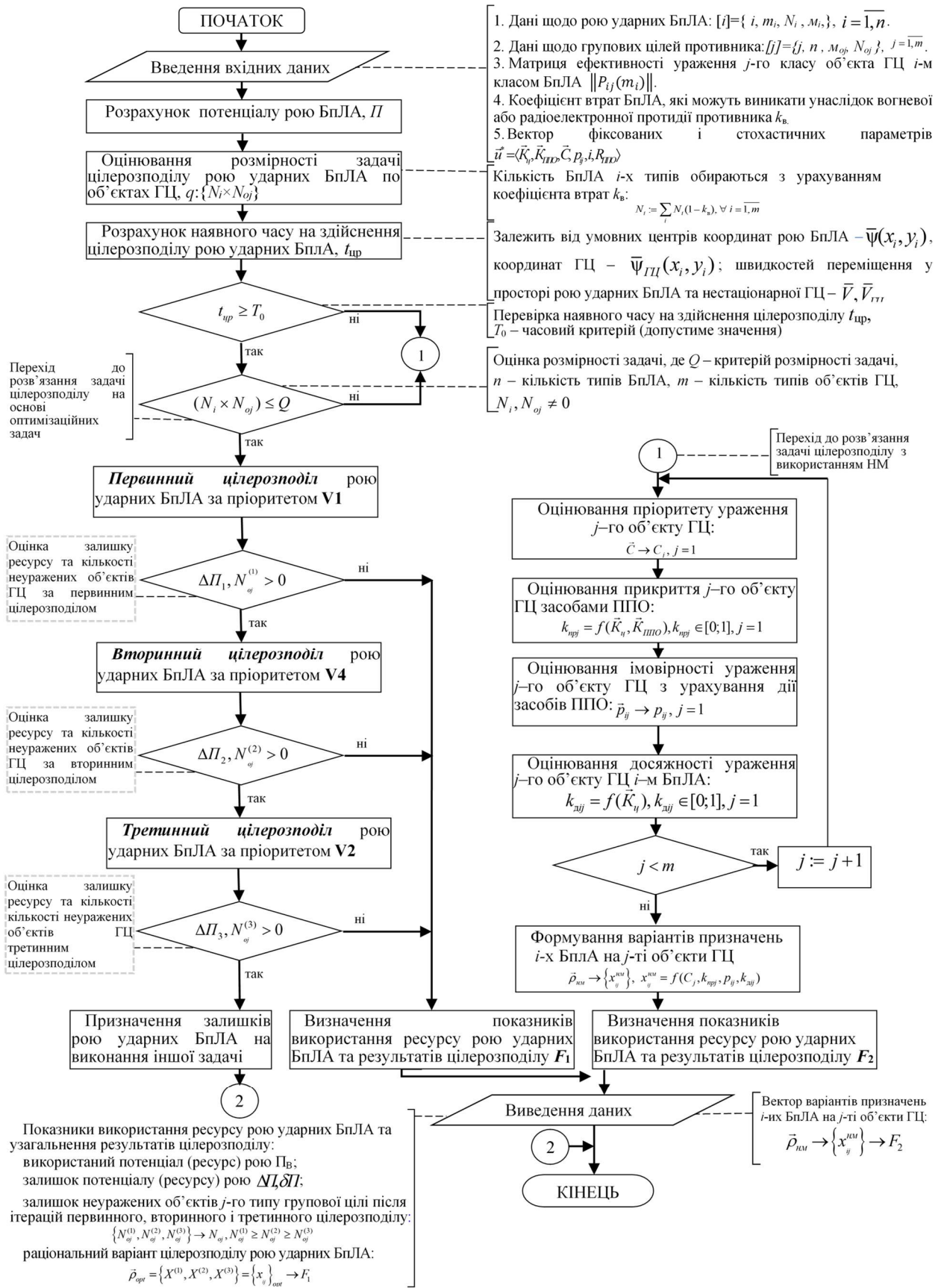


Рисунок 1 – Адаптивний алгоритм управління цілерозподілом рою ударних БпЛА для ураження нестационарних групових цілей із використанням елементів штучного інтелекту

Варіанти розподілу ударних безпілотних літальних апаратів на об'єкти ураження

Варіант	Зміст варіанта
V1	кожен i -й тип БПЛА оснащено БЧ масою M_i , що забезпечує найкраще гарантоване ураження конкретного j -го типу об'єкта за виконання жорсткої умови $M_i = M_j$, де M_j – мінімальна маса БЧ, достатня для ураження об'єкта j -го типу. У цьому випадку розглядається чітка прив'язка i -го типу БПЛА до об'єктів j -го типу (наприклад, $i \rightarrow j$: $\{1 \rightarrow 1, \dots, m \rightarrow n\}$)
V2	призначення «важких» БПЛА i -го типу з БЧ масою M_i на більш «легкий» (більш простий) об'єкт j -го типу групової цілі (умова $i \rightarrow j - a$, $a \in \mathbb{N}$) забезпечує його ураження, проте таке призначення є неприпустимим, але не раціональним з погляду використання ресурсу, адже маса БЧ буде надмірною ($M_i > M_j$)
V3	призначення БПЛА на більш важкий (більш складний) об'єкт групової цілі (умова $i \rightarrow j + a$, $a \in \mathbb{N}$) не забезпечує його ураження, адже маса його БЧ буде недостатньою для цього ($M_i < M_j$)
V4	призначення декількох «легких» БПЛА на більш важкий (більш складний) об'єкт групової цілі може забезпечити його ураження за виконання таких умов: $i \rightarrow j + a$, $a \in \mathbb{N}$, $\sum_i M_i \geq M_j$.

За невиконання умов:

$$(\Delta P_1, N_{oj}^{(1)} > 0) \vee (\Delta P_1, N_{oj}^{(1)} > 0) \vee (\Delta P_2, N_{oj}^{(2)} > 0) \vee (\Delta P_1, N_{oj}^{(1)} > 0) \vee (\Delta P_1, N_{oj}^{(1)} > 0) \vee (\Delta P_2, N_{oj}^{(2)} > 0) \quad (3)$$

здійснюється перехід до визначення показників використання ресурсу рою ударних БПЛА та результатів цілерозподілу F_1 :

$$F_1 = \begin{cases} P_B; \\ \Delta P, \delta P; \\ \{N_{oj}^{(1)}, N_{oj}^{(2)}, N_{oj}^{(3)}\} \rightarrow N_{oj}, N_{oj}^{(1)} \geq N_{oj}^{(2)} \geq N_{oj}^{(3)}; \end{cases} \quad (4)$$

де P_B – використаний потенціал (ресурс) рою;

$\Delta P, \delta P$ – абсолютний та відносний залишок потенціалу (ресурсу) рою;

$N_{oj}, N_{oj}^{(1)} \geq N_{oj}^{(2)} \geq N_{oj}^{(3)}$ – залишок неуражених об'єктів j -го типу групової цілі після ітерацій первинного, вторинного і третинного цілерозподілу;

$X^{(1)}, X^{(2)}, X^{(3)}$ – раціональний варіант цілерозподілу рою ударних БПЛА.

У разі недостатнього часу для здійснення цілерозподілу та значної розмірності задачі (тобто коли умови $(t_{up} > T_0) \wedge (N_i \times N_{oj} > Q)$ не виконуються) алгоритм передбачає розв'язання задачі цілерозподілу з використанням попередньо навченої нейронної мережі (див. праву гілку алгоритму, перехід до якої позначено 1). У загальному вигляді вхідні дані для цієї гілки алгоритму із використанням нейронної мережі можуть бути задані вектором: $\vec{u}^* = \langle \vec{K}_u, \vec{K}_{ппо}, \vec{C}, p_{ij}, i, R_{ппо} \rangle$ – вектор фіксованих і змінних параметрів. Фіксованими параметрами є координати цілей та координати засобів ППО, які прикривають групову ціль (та їхня кількість) – $\vec{K}_u, \vec{K}_{ппо}$, а змінними параметрами – пріоритет об'єктів групової цілі ($\vec{C}$); ймовірність ураження об'єктів ГЦ (p_{ij}); типи БПЛА (i); радіус дії засобів вогневої протидії противника (наприклад, радіус дії засобів ППО, які прикривають групову ціль, $R_{ппо}$).

Для ефективного застосування ударних БПЛА рою, відповідно до логіки навченої нейромережі,

передбачено їхній розподіл по цілях, які мають найбільший пріоритет. З цією метою на основі заданого вихідними даними вектора пріоритетів ураження об'єктів ГЦ ($\vec{C}$) нейронною мережею здійснюються такі процедури:

1. Оцінювання пріоритету ураження j -го об'єкта ГЦ: $\vec{C} \rightarrow C_j, j=1$, де C_j – скалярне значення пріоритету об'єкта j -го типу ГЦ, j – тип об'єкта ГЦ, m – кількість об'єктів у груповій цілі.

2. Оцінювання прикриття j -го об'єкта ГЦ засобами ППО для $j=1$. Це передбачає розрахунок коефіцієнта прикриття об'єктів групової цілі (k_{npj}) з урахуванням координат цілей та координат засобів ППО, які прикривають об'єкти групової цілі ($\vec{K}_u, \vec{K}_{ппо}$):

$$k_{npj} = f(\vec{K}_u, \vec{K}_{ппо}), k_{npj} \in [0; 1], j = 1. \quad (5)$$

3. Оцінювання ймовірності ураження j -го об'єкта ГЦ з урахування дії засобів ППО i -м типом БПЛА здійснюється з урахуванням заданого вхідними даними вектора ймовірності ураження j -го об'єкта ГЦ $\vec{p}_{ij}$ за таким правилом: $p_{ij} = \max\{\vec{p}_{ij}\}, j = 1$.

4. Оцінювання досяжності ураження j -го об'єкта ГЦ i -м БПЛА передбачає розрахунок коефіцієнта досяжності k_{dij} для $j=1$ з урахуванням заданого

вектора координат цілей: $k_{dij} = f(\vec{K}_u) = [0; 1], j = 1$.

Наведені вище процедури виконуються ітераційно до того часу, поки виконується умова $j < m$, тобто відбувається перебір усіх можливих об'єктів ГЦ (від 1 до m) з урахуванням пріоритетів їх ураження, прикриття засобами ППО, ймовірності їх ураження та досяжності для i -х БПЛА. Після досягнення умови $j = m$ здійснюється формування варіантів призначень i -х БПЛА на j -ті об'єкти ГЦ:

$$\vec{p}_{nm} \rightarrow \{x_{ij}^{nm}\}, x_{ij}^{nm} = f(C_j, k_{npj}, p_{ij}, k_{dij}), \quad (6)$$

де x_{ij}^{nm} – оптимальний варіант цілерозподілу рою ударних БПЛА по об'єктах ГЦ з використанням нейронної мережі.

Відповідно до логіки математичної моделі нейронної мережі цілерозподілу рою ударних БпЛА по об'єктах нестационарних ГЦ з урахуванням їхньої пріоритетності визначається вектор варіантів призначень i -х БпЛА на j -ті об'єкти групової цілі:

$$\vec{r}_{nm} \rightarrow \{x_{ij}^{nm}\} \rightarrow F_2. \quad (7).$$

Отже, на виході алгоритму отримується один із можливих результатів раціонального цілерозподілу (F_1 або F_2), які, залежно від критеріїв наявного часу та розмірності задачі, отримують завдяки використанню ітераційної оптимізаційної задачі або нейронної мережі цілерозподілу.

Для перевірки працездатності запропонованого адаптивного алгоритму управління цілерозподілом рою ударних БпЛА було проведено імітаційне моделювання за декількома варіантами вхідних даних. В результаті підтверджено, що алгоритм очікувано реагує на зміну параметрів рою і групових цілей у реальному часі та змінює спосіб розв'язання задачі цілерозподілу відповідно до обраних критеріїв. Перевагами запропонованого адаптивного алгоритму є: гнучкість у разі зміни стану групової цілі (зміна координат об'єктів ГЦ, їхнього стану (уражений, неуразений)); зміни стану рою ударних БпЛА (ступінь їхніх можливих втрат); можливість вибору оптимального варіанта цілерозподілу з урахуванням пріоритетів ураження об'єктів ГЦ, прикриття їх засобами ППО, імовірності їх ураження та досяжності для i -х БпЛА; можливість адаптивного вибору способу розв'язання задачі з урахуванням її розмірності та наявного часу на здійснення цілерозподілу – за допомогою типової оптимізаційної задачі або за допомогою навченої нейронної мережі.

Крім того, зважаючи на визначену мету дослідження, сформовано рекомендації щодо підвищення ефективності застосування роїв ударних БпЛА – за рахунок адаптивного управління цілерозподілом рою ударних БпЛА залежно від наявного часу на його здійснення та розмірності задачі. Як варіант підвищення ефективності застосування рою ударних БпЛА без зміни його кількісних та якісних характеристик може бути досягнуто завдяки програмній реалізації алгоритму управління цілерозподілом рою різнотипних ударних БпЛА для ураження нестационарних ГЦ із використанням елементів штучного інтелекту. Під час програмної реалізації розробленого адаптивного алгоритму слід враховувати таке:

1. У разі достатнього часу на здійснення цілерозподілу t_{up} та незначної розмірності задачі Q пропонується розв'язувати задачу цілерозподілу ітераційним шляхом на основі типової оптимізаційної задачі про призначення, реалізований в алгоритмі (ліва гілка, рис. 1). Водночас, допустимим значенням слід вважати час T_0 для розв'язання задачі цілерозподілу, який визначається виходячи з тактичних міркувань (тобто час розв'язання задачі цілерозподілу має не перевищувати підльотний час рою до об'єктів

ураження). Цього часу має бути достатньо в реальних умовах, коли рій ударних БпЛА знаходиться в районі ГЦ, об'єкти ГЦ візуально доступні, а швидкість БпЛА у рої умовно не перевищує 150 км/год (це є додатковим критерієм підльотного часу БпЛА рою до будь-якого об'єкта ГЦ).

2. Стосовно критерію розмірності задачі Q , яка впливає на швидкість отримання результату цілерозподілу. Наприклад, під час реалізації алгоритму доцільно враховувати результати чисельних експериментів щодо розв'язання задачі цілерозподілу з використанням типових оптимізаційних задач (про призначення, жадібного алгоритму, про рюкзак), відповідно до яких збільшення розмірності задачі до 8×8 , час її розв'язання збільшується до 8-10 с, а у задачах 10×10 може сягати 30 с і більше, що пояснюється різким зростанням кількості обчислювальних процедур. З огляду на це, допустимим критерієм Q слід вважати задачу розмірністю не більше 5×5 ;

3. У разі обмеженого часу на здійснення цілерозподілу $t_{up} < T_0$ або зі збільшенням розмірності задачі $(N_i \times N_{oj}) > Q$ пропонується відповідно до логіки алгоритму перейти до розв'язання задачі цілерозподілу навченої нейронної мережі. За результатами чисельного експерименту, проведеного для різних розмірностей задачі від $q: \{5 \times 5\}$ до $q: \{100 \times 100\}$, час розв'язання задачі нейронною мережею не перевищує до 2–3 с), що дає змогу використовувати розроблений алгоритм управління цілерозподілом у разі застосування великих роїв швидкісних ударних БпЛА.

4. Доцільно передбачити можливість донавчання нейронної мережі за даними цілерозподілу, що здійснюється за допомогою оптимізаційного алгоритму, який застосовується для задач невеликої розмірності (у разі застосування невеликих роїв БпЛА).

5. Оскільки навчена нейронна мережа може розв'язувати задачі цілерозподілу як малих, так і великих розмірностей, у разі програмної реалізації алгоритму слід передбачити можливість резервування обох передбачених у алгоритмі способів. Це підвищить надійність, точність розрахунків, що сприятиме ефективному виконанню завдань роєм ударних БпЛА.

Також алгоритм управління цілерозподілом рою різнотипних ударних БпЛА для ураження нестационарних ГЦ із використанням штучного інтелекту може бути використано на етапах планування застосування роїв БпЛА підрозділами БпАК (безпілотних авіаційних комплексів), зокрема, під час формування та порівняння ефективності різних варіантів складу (маси БЧ, типів БпЛА, їхньої кількості тощо) та способів застосування роїв БпЛА з урахуванням можливої протидії противника (завдяки урахуванню коефіцієнта k_b). У цьому разі можливий вибір найбільш раціональних варіантів складу рою ударних БпЛА, який для заданих типів ГЦ забезпечить максимальну ефективність їх ураження.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Отже, у статті розкрито питання управління цілерозподілом рою різнотипних ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей на основі адаптивного алгоритму з використанням евристичного оптимізаційного методу та елементів штучного інтелекту. Запропонований алгоритм реалізує послідовність дій, передбачених математичною моделлю динамічного цілерозподілу рою різнотипних ударних безпілотних літальних апаратів по об'єктах нестационарних групових цілей з урахуванням їх пріоритетності, й дає змогу: вирішувати завдання динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів по різнорідних об'єктах групової цілі на основі класичної оптимізаційної «задачі про призначення» або на основі використання навченої нейромережі цілерозподілу; оцінювати та порівнювати варіанти цілерозподілу рою ударних безпілотних літальних апаратів по різнорідних об'єктах групової цілі противника.

Адаптивність алгоритму забезпечується завдяки можливості вибору способу розв'язання задачі за критеріями її розмірності та наявного часу. Новизна адаптивного алгоритму управління цілерозподілом рою ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей полягає у комплексному застосуванні двох способів розв'язання задачі цілерозподілу: на основі типових оптимізаційних задач розподілу неоднорідних ресурсів та з використанням навченої нейронної мережі. Водночас, зазначені способи обираються адаптивно залежно від наявного (припустимого) часу на розв'язання задачі цілерозподілу та її розмірності, що дає змогу врахувати умови обстановки та отримати оптимальний варіант цілерозподілу рою ударних БпЛА по об'єктах нестационарних групових цілей, за якого забезпечується їхній максимальний збиток, з урахуванням пріоритетів ураження об'єктів групових цілей, прикриття їх засобами протиповітряної оборони, ймовірності їх ураження та досяжності для ударних безпілотних літальних апаратів рою.

Список бібліографічних посилань

1. **Волонтерка.** Думки залізного генерала. 2025. URL: <https://dl-news.defence-line.org/?p=57440&sfnsn=mo> (дата звернення: 25.09.2025). 2. **Методи та системи штучного інтелекту:** навч. посіб. для студентів спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» / Уклад.: І. М. Удовик, Г. М. Коротенко, Л. М. Коротенко, В. О. Трусов, А. Т. Харь. Дніпро: Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2017. 105 с. 3. **Солодовник Г. В.** Методи та системи штучного інтелекту. Харків : ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2021. 177 с. 4. **Василенко О. А.** Методи математичного моделювання застосування рою ударних безпілотних апаратів. *Повітряна міць України*. 2025. № 1 (8). С. 54–70. DOI: 10.33099/2786-7714-2025-1-8-54-70. 5. **Шовкошитний І. І., Василенко О. А.** Метод динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів на основі ітераційних процедур задачі про

Алгоритм може бути реалізовано у вигляді програмного модуля:

у системах прийняття рішень (щодо застосування рою), за участі відповідного персоналу органів управління, які планують застосування роїв безпілотних літальних апаратів (частини (підрозділи) Сил безпілотних систем Збройних Сил України (коли час умовно необмежений);

у системах бойового управління (автономних системах управління роєм безпілотних літальних апаратів) – участі оператора немає (вона мінімальна), цілерозподіл відбувається у реальному часі.

Розроблені рекомендації щодо підвищення ефективності застосування роїв ударних безпілотних літальних апаратів базуються на розробленому алгоритмі управління цілерозподілом рою ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей із застосуванням елементів штучного інтелекту, який дає можливість враховувати наявний час на здійснення цілерозподілу та розмірність задачі.

Перспективними напрямками подальших досліджень є:

програмна реалізація запропонованого алгоритму та розроблення рекомендацій щодо його практичного використання в органах управління та під час удосконалення автономних систем прийняття рішень (наведення та цілерозподілу) у безпілотних авіаційних системах, особливо в умовах його ройового застосування для ураження об'єктів противника;

проведення аналітичного моделювання для формалізації задачі цілерозподілу різних типів роїв та цілей з використанням інших класичних постановок оптимізаційних задач, а також імітаційного моделювання для оцінювання ефективності алгоритмів цілерозподілу роїв ударних БпЛА та інших керованих авіаційних засобів ураження в умовах змінної обстановки.

Також науковий інтерес становить задача з визначення часу на здійснення цілерозподілу, яка полягає в оцінюванні взаємних параметрів двох типів динамічних об'єктів рою ударних безпілотних літальних апаратів та нестационарних групових цілей.

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. 6. **Компанієць О. М., Дмитрієв А. Г., Шмаков В. В., Ушань В. М.** Управління роєм безпілотних літальних апаратів на полі бою методами ройового інтелекту. *Системи озброєння і військова техніка*. 2024. № 2 (78). С. 73–80. DOI: <https://doi.org/10.30748/soivt.2024.78.08>. 7. **Журавська І. М.** Гетерогенні комп'ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БпЛА: моногр. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2019. 192 с. 8. **Артюшин Л. М., Кононов О. А., Герасименко В. В., Наусенко Б. Ю.** Метод вибору варіанта реалізації групового застосування безпілотних літальних апаратів. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2022. № 1 (43). С. 48–59. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2022-44-2-10-20>.

9. Шовкошитний І. І., Василенко О. А. Проблемні питання ройового застосування ударних безпілотних літальних апаратів. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2023. № 3 (48). С. 27–34. DOI:10.33099/2311-7249/2023-48-3-27-34.

10. 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. *Зб. наук. пр. Центру воєнно-стратегічних досліджень Нац. ун-ту оборони України*. 2024. № 3 (83). С. 108–116. DOI: 10.33099/2304-2745/2024-3-83/108-116. 11. Романюк В. А., Гримуд А. Г. Методологічні основи синтезу системи управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2025. № 53 (2). С. 156–172. DOI: 10.33099/2311-7249/2025-53-2-156-172.

MANAGEMENT OF THE TARGET DISTRIBUTION OF A SWARM OF DIFFERENT TYPES OF STRIKE UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR STRIKING NON-STATIONARY GROUP TARGETS BASED ON AN ADAPTIVE ALGORITHM USING OPTIMISATION METHODS AND ELEMENTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

SHOVKOSHYTNYI Ihor, Doctor of Technical Science, Senior Research Fellow, The Centre for Military and Strategic Studies of the National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-9245-4111>,

VASYLENKO Olha, Central Scientific and Research Institute of Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-2633-0131>

Formulation of the problem in general. The article addresses the current issue of managing the target distribution of swarms of strike unmanned aerial vehicles, designed to engage non-stationary group targets, based on a proposed adaptive algorithm. This algorithm enables the optimal target distribution option to be obtained, taking into account dynamically changing conditions. **The purpose** of this article is to develop an adaptive algorithm for managing the target distribution of a swarm of different types of strike unmanned aerial vehicles, aiming to strike non-stationary group targets using elements of artificial intelligence. Additionally, it formulates recommendations for improving the effectiveness of strike unmanned aerial vehicle swarms through adaptive management of their target distribution.

Research methods. The following methods were employed in writing this article: general scientific methods (analysis, comparison), methods of mathematical logic, optimisation methods, particularly integer programming, as well as artificial intelligence methods, specifically machine learning.

Literature review. An analysis of scientific sources on the selected topic reveals that when addressing the issue of selecting control models for a group (or swarm) of unmanned aerial vehicles, authors emphasise that hybrid multi-agent solutions, which utilise both traditional methods and elements of artificial intelligence, are currently gaining popularity. From the perspective of distributing a swarm of unmanned aerial vehicles among targets for destruction, the class of task allocation models is of interest, as they are capable of optimally assigning tasks to strike unmanned aerial vehicles, thereby increasing the overall productivity of the group (swarm).

Research results. An adaptive algorithm has been developed for controlling the target distribution of a swarm of strike unmanned aerial vehicles for striking non-stationary group targets using elements of artificial intelligence, which makes it possible to solve the problem of target distribution of heterogeneous swarms of strike unmanned aerial vehicles on heterogeneous objects of the enemy's group target in conditions where information about the state of the swarm of strike unmanned aerial vehicles and the state of the group target is incomplete. Under such conditions, the target distribution task is solved comprehensively using two methods: a heuristic optimisation method and a trained neural network. The use of a trained neural network will make it possible to obtain rational options for target allocation of a swarm of strike unmanned aerial vehicles against non-stationary group targets, which, in conditions of incomplete input information and partial loss of unmanned aerial vehicles in the swarm, will ensure acceptable target allocation results within the available resources. Recommendations are provided on increasing the effectiveness of swarm-based strike unmanned aerial vehicles through adaptive control of the target distribution of such swarms, as well as the features of the software implementation of the proposed algorithm.

Research novelty. The element of scientific novelty is that the adaptive algorithm for controlling the target distribution of a swarm of strike unmanned aerial vehicles for striking non-stationary group targets using elements of artificial intelligence consists in the comprehensive application of two methods for solving the target distribution problem (based on typical optimisation problems of distributing heterogeneous resources and using a trained neural network), the choice of which is made adaptively depending on the criteria of available (acceptable) time and the dimensionality of the target distribution problem. In addition, the algorithm allows for the prioritisation of group target destruction, their coverage by air defence systems, the probability of their destruction, and their reachability, thereby ensuring maximum damage to non-stationary group targets through the rational use of swarm resources for strike unmanned aerial vehicles.

Theoretical and practical significance. An adaptive algorithm for controlling the target distribution of a swarm of strike unmanned aerial vehicles, utilising elements of artificial intelligence, can be employed in the development of software modules for controlling the target distribution of heterogeneous swarms of unmanned aerial vehicles. This approach enables the detection and striking of heterogeneous objects. The algorithm and recommendations for its application can be implemented in decision-making systems (for planning the use and direct application of swarms of unmanned aerial vehicles) and in combat control systems (autonomous control systems for swarms of unmanned aerial

vehicles), where target distribution is carried out in real-time.

Conclusions and future work. Promising areas for further research include the software implementation of the proposed algorithm and the development of recommendations for its practical use in military command and control structures and in the improvement of autonomous decision-making systems (guidance and target allocation) in unmanned aerial systems, especially in the context of its swarm application for striking enemy targets. Also, of scientific interest is the task of determining the time required for target allocation, which involves evaluating the mutual parameters of two types of dynamic objects: a swarm of strike-unmanned aerial vehicles and non-stationary group targets.

Key words: strike unmanned aerial vehicles, mathematical model, dynamic targeting method, target distribution control, swarm of strike unmanned aerial vehicles, adaptive algorithm, neural network, destruction of non-stationary group targets, effectiveness of using, analytical modelling, simulation modelling.

References

1. **Volunteer**, (2025). *Thoughts of the Iron General*. [online]. Available at: <https://dl-news.defence-line.org/?p=57440&sfnsn=mo> [Accessed: 25 September 2025].
2. **Methods and Systems of Artificial Intelligence**. (2017). (Compiled by: I. M. Udovyyk, G. M. Korotenko, L. M. Korotenko, V. O. Trusov, A. T. Khar). State Higher Educational Institution «National Mining University».
3. **Solodovnik, G. V.**, (2021). *Methods and Systems of Artificial Intelligence*. LLC «DISA PLUS».
4. **Vasylenko, O. A.** (2025). Methods of mathematical modeling of the use of a swarm of striking unmanned aerial vehicles. *Air power of Ukraine*, 1 (8), 54–70. DOI: 10.33099/2786-7714-2025-1-8-54-70.
5. **Shovkoshytskyi, I. I., Vasylenko, O. A.**, (2025). Method of dynamic target distribution of a heterogeneous swarm of strike unmanned aerial vehicles based on iterative assignment procedures. *Modern information technologies in the field of security and defence*, 2 (53), 138–149. DOI: 10.33099/2311-7249/2025-53-2-138-149.
6. **Kompaniets, O. M., Dmitriev, A. G., Shmakov, V. V., Ushan, V. M.**, (2024). Control of a swarm of unmanned aerial vehicles on the battlefield using swarm intelligence methods. *Weapons Systems and Military Equipment*, 2 (78), 73–80. DOI: <https://doi.org/10.30748/soivt.2024.78.08>.
7. **Zhuravska, I. M.**, (2019). *Heterogeneous computer networks for critical applications based on swarms and flocks of UAVs*. Petro Mohyla National University Publishing House.
8. **Artyushin, L. M., Kononov, O. A., Gerasimenko, V. V., Nausenko, B. Y.**, (2022). Method of choosing the option for the implementation of group use of unmanned aerial vehicles. *Modern information technologies in the field of security and defence*, 1 (43), 48–59. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2022-44-2-10-20>
9. **Shovkoshytskyi, I. I., Vasylenko, O. A.**, (2023). Problematic issues of swarming use of striking uncrewed aerial vehicles. *Modern information technologies in the field of security and defence*, 3 (48), 27–34. DOI: 10.33099/2311-7249/2023-48-3-27-34.
10. **Shovkoshytskyi, I. I., Vasylenko, O. A.**, (2024). Development of a logical-temporal model for the swarm application of strike unmanned aerial vehicles, taking into account typical methods of their group application in modern conditions. *Collection of the scientific papers of the Centre for Military and Strategic Studies of the National University of Defence of Ukraine*, 3 (83), 108–116. DOI: 10.33099/2304-2745/2024-3-83/108-116.
11. **Grymud, A. G.**, (2025). Methodological foundations for the synthesis of a control system for a group (swarm) of unmanned aerial vehicles. *Modern information technologies in the field of security and defence*, 53 (2), 156–172. DOI: 10.33099/2311-7249/2025-53-2-156-172.

Рукопис надійшов до редакції	04.10.2025
Рукопис прийнято до друку після рецензування	10.11.2025
Дата публікації	30.12.2025