

ШОВКОШИТНИЙ Ігор Іванович,

доктор військових наук, старший науковий співробітник,
Центр військово-стратегічних досліджень Національного університету оборони України,
<https://orcid.org/0000-0001-9245-4111>

ВАСИЛЕНКО Ольга Анатоліївна,

Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України,
<https://orcid.org/0000-0003-2633-0131>

МЕТОД ДИНАМІЧНОГО ЦІЛЕРОЗПОДІЛУ НЕОДНОРІДНОГО РОЮ УДАРНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ ІТЕРАЦІЙНИХ ПРОЦЕДУР «ЗАДАЧІ ПРО ПРИЗНАЧЕННЯ»

У статті викладено метод динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів на основі ітераційних процедур «задачі про призначення» по різномірних об'єктах групової цілі противника. Метод враховує різні варіанти сценаріїв несиметричного конфлікту «неоднорідний рій безпілотних літальних апаратів – різномірні об'єкти групової цілі противника», а також обмеження, пов'язані з втратами ресурсів рою, пріоритетністю цілей противника і швидкою зміною бойової обстановки. Визначено низку обмежень і припуцень, на основі евристичного підходу сформовано варіанти розподілу безпілотних літальних апаратів неоднорідного рою на різномірні об'єкти групової цілі противника, а також обґрунтовано їхні пріоритети, що враховано під час формалізації розв'язуваної задачі цілерозподілу. Показано, що логіка «задачі про призначення» на усіх етапах методу залишається збереженою, а відомі обмеження не порушуються. Новизна методу зводиться до використання ітераційних процедур типової оптимізаційної «задачі про призначення» для раціонального використання ресурсу ударних безпілотних літальних апаратів із комплексним урахуванням: різних сценаріїв несиметричного конфлікту «неоднорідний рій безпілотних літальних апаратів – різномірні об'єкти групової цілі противника»; коефіцієнта втрат безпілотних літальних апаратів внаслідок вогневої або радіоелектронної протидії противника; залишку потенціалу (ресурсу) рою ударних безпілотних літальних апаратів після кожної ітерації цілерозподілу; залишку неуразжених об'єктів групової цілі після ітерації первинного, вторинного і третинного цілерозподілу. Наведено порядок визначення додаткових показників за допомогою методу, зокрема: використаного ресурсу рою ударних безпілотних літальних апаратів, його залишку (сумарної невикористаної маси бойової частини) після кожної ітерації цілерозподілу, а також кількості неуразжених різномірних «об'єктів противника». Логіка та працездатність методу підтверджена розрахунками. Метою статті є розроблення методу динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів на основі ітераційних процедур «задачі про призначення» по різномірних об'єктах групової цілі противника.

Методи дослідження. Під час написання статті застосовано: загальнонаукові методи (аналізу, порівняння), положення системного підходу, методи комбінаторного аналізу, методи оптимізації, зокрема, однієї із задач лінійного цілочисельного програмування.

Отримані результати дослідження. Авторами розроблений метод, який дає змогу розв'язати задачу цілерозподілу неоднорідних роїв ударних безпілотних літальних апаратів 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»). Проведена формалізація задачі та запропоновано узагальнену схему методу. Серією розрахунків показано працездатність запропонованого методу динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів на основі ітераційних процедур «задачі про призначення».

Елементом наукової новизни є те, що розроблений метод цілерозподілу неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів по різномірних об'єктах групової цілі противника зводиться до використання ітераційних процедур типової оптимізаційної «задачі про призначення» для раціонального використання ресурсу ударних безпілотних літальних апаратів з комплексним урахуванням: різних сценаріїв несиметричного конфлікту «неоднорідний рій безпілотних літальних апаратів – різномірні об'єкти групової цілі противника»; коефіцієнта втрат безпілотних літальних апаратів внаслідок вогневої або радіоелектронної протидії противника; залишку потенціалу (ресурсу) рою ударних безпілотних літальних апаратів після кожної ітерації

цілерозподілу; залишку неуражених об'єктів групової цілі після ітерацій первинного, вторинного і третинного цілерозподілу.

Теоретична й практична значущість викладеного у статті. Запропоновано метод розв'язання задачі цілерозподілу неоднорідних ресурсів на основі класичної «задачі про призначення» з послідовним використанням варіантів розподілу ресурсів відповідно до їхніх пріоритетів (за умов, коли кількість ресурсів (ударних безпілотних літальних апаратів) не відповідає кількості об'єктів ураження). Запропонований метод може бути враховано під час розроблення моделей та алгоритмів ройової поведінки неоднорідних груп безпілотних літальних апаратів у процесі спільного виконання завдань із виявлення та ураження різномірних об'єктів.

Ключові слова: ударні безпілотні літальні апарати, рій, алгоритми ройової поведінки, метод динамічного цілерозподілу, задача про призначення, ітераційні процедури.

Вступ

З початку повномасштабної війни російської федерації проти України важливого значення набув розвиток безпілотних авіаційних апаратів (далі – БпЛА), характерною рисою якого є масове застосування зазначеного класу озброєння обома сторонами. Ця тенденція обумовлює необхідність активізації досліджень, що пов'язані із змінами форм і способів застосування підрозділів безпілотних систем Збройних Сил України, особливо в умовах впровадження перспективних ройових принципів спільного використання неоднорідних БпЛА. Задача цілерозподілу рою неоднорідних БпЛА по різномірних об'єктах групової цілі противника може розв'язуватися за допомогою типових оптимізаційних задач, постановки яких можуть змінюватись залежно від змісту, умов задачі та інтерпретації низки обмежень.

Постановка проблеми. Новітні технології ройового застосування бойових безпілотних (роботизованих) систем досліджуються багатьма країнами, але ці дослідження зі зрозумілих причин мають закритий характер. Увага зосереджується, зокрема, на розвитку методів і алгоритмів ройової поведінки ударних та багатоцільових БпЛА. Ідея полягає у досягненні узгодженості дій значної кількості однотипних або різнотипних БпЛА під час виконання ними бойових завдань, забезпечення автономності дій та адаптивної групової поведінки агентів рою, що має забезпечити максимальний ефект зі збереженням високої стійкості рою до втрат БпЛА. За цих умов 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 конкретного завдання (цілі) в умовах динамічної зміни обстановки, пріоритетності ураження цілей та доступних залишків ресурсу (кількості БпЛА, запасу пального (заряду батарей), боєприпасів тощо) [2]. Також слід враховувати, що в бойових умовах досить складним завданням вважається ураження групових цілей, які відрізняються достатнім рівнем адаптивності та живучості в умовах радіоелектронно-вогневого впливу. Отже, виникає нетривіальний конфлікт «неоднорідний рій БпЛА – різномірні об'єкти групової цілі противника», у якому треба оперативно вирішувати завдання цілерозподілу з урахуванням

змін обстановки, залишків ресурсу та пріоритетності цілей.

З огляду на високу динаміку бойових дій, стандартні статичні підходи до задачі цілерозподілу можуть бути неефективними. Це вимагає створення нових алгоритмів, що враховують зміни в обстановці, складі рою (в результаті втрати (витрати) БпЛА), появу нових цілей та зміну її пріоритетів. Враховуючи зазначене, тематика статті, яка присвячена питанням цілерозподілу неоднорідного рою ударних БпЛА, в сучасних умовах є вкрай важливою. За таких умов, актуальним науковим завданням є розроблення методу динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних БпЛА на основі ітераційних процедур «задачі про призначення».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування роїв БпЛА досліджувалась у роботах [1-3]. Проблемні питання ройового застосування ударних БпЛА висвітлені у [3], на підставі чого розроблено логіко-часову поетапну модель з етапами адаптивного вибору алгоритмів дій БпЛА в різних умовах, розподілу функцій між окремими агентами рою, розпізнавання цілей, їх атаки, контролю результатів ураження та реконфігурації залишків БпЛА рою для подальшого виконання завдань. Окремо виділена проблема самоорганізації рою як складної просторово-розподіленої системи на основі алгоритмів штучного інтелекту. Проте питання цілерозподілу авторами віднесені до перспективних напрямів дослідження [4].

У [5-7] розглянуто підходи до вирішення типових завдань координації рою БпЛА, навігації, уникнення перешкод тощо. Проте задача цілерозподілу ударних БпЛА у рої комплексно не розв'язувалась [8].

У деяких класичних оптимізаційних задачах цілерозподіл базується на «задачі про призначення» (assignment problem), яка дозволяє ефективно вирішувати проблему за принципом «один засіб на один об'єкт (роботу, ціль)» [9]. Подібна задача також може зводитись до різних варіантів транспортної задачі, яка використовується для розподілу засобів протиповітряної оборони (далі – ППО) по групах цілей [10] або може бути розв'язана з використанням жадібного алгоритму (greedy algorithm) [11]. Під час розв'язання практичних задач виникає низка проблемних питань [12], зокрема: зростання кількості можливих станів зі збільшенням типів ресурсів, що

ускладнює обчислення; значна обчислювальна складність, особливо за наявності неоднорідних ресурсів; специфічність функцій корисності для кожного ресурсу. Одним із перспективних напрямів розв'язання задачі цілерозподілу неоднорідних ресурсів вважаються нейронні мережі. Проте їх використання потребує ретельної формалізації, чіткої постановки задачі, підготовки вихідних даних і вибору алгоритмів навчання нейронної мережі для забезпечення можливості отримання адекватних результатів цілерозподілу.

Отже, проведений аналіз наукових джерел з обраної тематики свідчить про те, що використовувані методи без додаткової адаптації не можуть бути використані для розв'язання задачі цілерозподілу неоднорідного рою ударних БпЛА по різномірних об'єктах групової цілі противника. Як варіант, задачу може бути розв'язано шляхом використання ітераційних процедур та типового порядку розрахунків, передбачених відомою «задачею про призначення», особливості якої розглянуто у статті.

Метою статті є розроблення методу динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів на основі ітераційних процедур «задачі про призначення».

Виклад основного матеріалу дослідження

Під неоднорідним роєм ударних БпЛА будемо розуміти сукупність безпілотних літальних апаратів ударного типу, які діють у складі рою, але відрізняються між собою за ключовими характеристиками, такими як тип озброєння, злітна маса (у тому числі маса бойової частини), тактичний радіус, швидкість і висота польоту, рівень автономності, функціональні можливості, кількість можливих застосувань. Такий рій є більш стійким і ефективним у виконанні завдань з ураження об'єктів групових цілей, особливо в умовах складного бойового середовища.

Метод передбачає розв'язання задачі цілерозподілу неоднорідного рою ударних БпЛА по різномірних об'єктах групової цілі противника на основі класичної «задачі про призначення» (assignment problem) – типової задачі комбінаторної оптимізації. У загальному вигляді задача може бути сформульована таким чином: необхідно знайти оптимальний план розподілу ресурсу неоднорідного рою ударних БпЛА по різномірних об'єктах групової цілі, за якого забезпечується максимальний збиток групової цілі при раціональному використанні потенціалу (ресурсу) рою за певних обмежень на призначення. Узагальнена схема методу, наведена на рис. 1, передбачає шість етапів.

Етап 1 (підготовчий) – передбачає введення вхідних даних, а також формування низки обмежень та припущень. Введемо основні вхідні дані. Припустимо,

що рій ударних БпЛА виконує завдання щодо ураження об'єктів групової цілі. Рій вважається неоднорідним і складається з ударних БпЛА i -их типів, $i = \overline{1, m}$, кількість БпЛА кожного типу становить $N_i \in \mathbb{N}$. Кожен тип БпЛА має відповідну бойову частину (далі – БЧ) масою m_i , яка забезпечує ураження певного типу цілі. Потенціал (ресурс) рою ударних БпЛА має бути оптимально розподілений для ураження різномірних об'єктів j -го типу, $j = \overline{1, n}$. Кількість типів об'єктів групової цілі становить $N_j \in \mathbb{N}$.

Для переходу до наступних етапів методики, з метою оцінювання доцільності (можливості) практичного застосування «задачі про призначення» для динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних БпЛА, проведемо оцінювання її обмежень [13] та визначимо заходи щодо їх подолання:

1. Вимога до симетричності задачі та повної відповідності кількості об'єктів і ресурсів (умова $m=n$). На практиці можливі варіанти $m>n$, $n>m$. Обмеження усувається зведенням задачі до симетричної завдяки доданню j -их псевдооб'єктів або i -их псевдоресурсів (БпЛА).

2. Складність врахування додаткових обмежень. У нашому випадку це можуть бути пріоритет об'єктів ураження, відстані між об'єктами та ударними БпЛА, протидія противника, що спричиняє втрати деяких БпЛА. Ці обмеження можуть бути враховані завдяки введенню в задачу безрозмірних показників «витрат-прибутку». Фактор протидії противника можна врахувати коефіцієнтами витрат БпЛА під час оцінювання початкового ресурсу рою та складання матриці призначень.

3. «Статичність задачі», що пов'язано з припущенням, що всі дані щодо об'єктів ураження та ударних БпЛА відомі та не змінюються. Подолання обмеження забезпечується завдяки використанню ітераційних процедур класичної задачі про призначення.

4. Одновимірність критерію оптимальності. Таким критерієм є збиток груповій цілі та/або витрати ресурсу рою БпЛА.

5. Проблема масштабованості задачі у разі збільшення її розмірності та зростання обчислювальних витрат. У цьому плані проблема вирішується шляхом введення обмежень на призначення i -их БпЛА на ураження j -их об'єктів ($i \neq j$).

Отже, загальновідома математична постановка «задачі про призначення» потребує певної адаптації до змісту вирішуваної проблеми з урахуванням особливостей вхідних даних та низки обмежень і припущень. Розглянемо припущення. Неоднорідний рій ударних БпЛА знаходиться у районі групової цілі, усі об'єкти у її складі виявлені. Дистанції від БпЛА до об'єктів ураження та їхня пріоритетність у складі групової цілі не враховуються. Всі об'єкти групової цілі знаходяться в межах досяжності ударних БпЛА рою.

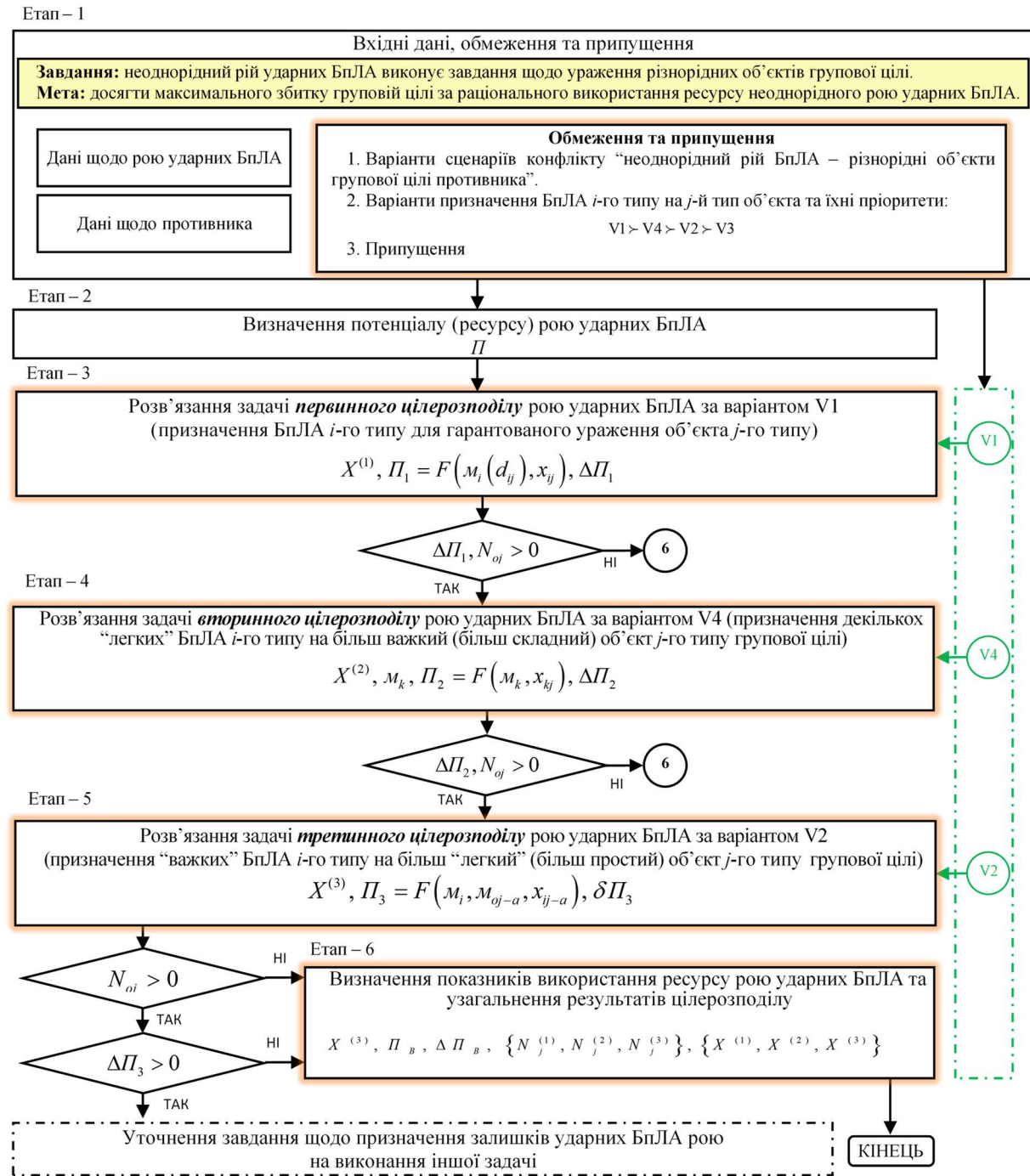


Рисунок 1– Узагальнена схема методу динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів на основі ітераційних процедур “задачі про призначення”

Введемо можливі варіанти розподілу БпЛА на об'єкти ураження:

V1 – кожен i -ий тип БпЛА оснащений 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 припустимим, але не раціональним з точки зору 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:

$$i \rightarrow j + a, a \in \mathbb{N}, \sum_i m_i \geq m_{oj}. \quad (1)$$

З опису варіантів розподілу БпЛА видно, що варіант V1 є базовим, хоча й жорстким, варіант V3 – недоцільним (неефективним), а варіанти V2 і V4 – припустимими (компромісними), які застосовуватимуться після вичерпання ресурсу рою БпЛА за базовим варіантом розподілу V1. Пріоритетним після нього є варіант V4, адже «легкі» БпЛА i -го типу вже вважатимуться використаними, а їхній залишок може бути розподілений (у разі кооперації декількох БпЛА i -го типу в суброї k -го типу) на відповідні об'єкти j -го типу за виконання умови (1). Наступним з точки зору максимального ресурсу рою БпЛА слід вважати використання варіанта V2. Отже, пріоритети варіантів розподілу БпЛА рою визначимо як $V1 \succ V4 \succ V2 \succ V3$.

З урахуванням сформованих умов і обмежень перейдемо до наступних етапів методу.

Етап 2 передбачає визначення потенціалу (ресурсу) рою ударних БпЛА, який характеризує його можливість уражати об'єкти певного типу у складі групової цілі. Потенціал рою може бути пов'язаний із масою БЧ БпЛА i -их типів, що забезпечують ураження відповідних об'єктів ($i \rightarrow j$), і визначається як:

$$P = \sum_i m_i \cdot N_i, \quad i = \overline{1, m}. \quad (2)$$

за умови виконання таких обмежень:

$$P_1 = F(m_i(d_{ij}), x_{ij}) = \sum_i \sum_j m_{ij}(d_{ij}) \cdot x_{ij} \rightarrow \max \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq \sum_{i=1}^m N_i \cdot (1 - k_b), \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{in} \leq 1, \quad \forall j = \overline{1, n}, \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{in} \leq 1, \quad \forall i = \overline{1, m}, \\ x_{ij} \in \{0; 1\}, \end{cases} \quad (4)$$

де: $m_i(d_{ij})$ – умовна маса БЧ БпЛА;

d_{ij} – коефіцієнт блокування призначення;

x_{ij} – цілочисельний аргумент ухвалення рішення про призначення БпЛА i -го типу на об'єкт ураження j -го типу у складі групової цілі;

N_i – наявний ресурс (початкова кількість ударних БпЛА i -го типу у складі рою);

k_b – коефіцієнт втрат БпЛА, які можуть виникати унаслідок вогневої або радіоелектронної протидії противника, $k_b = \overline{0, 1}$.

Отримана оптимізаційна задача (3)–(4) не відповідає класичним постановкам задач лінійного програмування [14; 15]. Зокрема, додаткової

За умовами задачі цілерозподіл неоднорідного рою ударних БпЛА здійснюється на основі ітераційних процедур. У першій ітерації витрачатиметься частка потенціалу $P_1 \leq P$, у другій – $P_2 \leq P_1$, у наступних ітераціях – $P_k \leq P_{k-1}$. Ідеальний цілерозподіл ресурсу рою передбачає ураження усіх об'єктів групової цілі за поступової витрати ресурсу рою до його повного вичерпання $P_k \rightarrow 0$. Проте, більш реальними з погляду співвідношення завдань та наявних ресурсів є незбалансовані (відкриті) задачі (коли $m \neq n$), що виправдовує ітераційне використання наступних оптимізаційних процедур цілерозподілу.

Етап 3 (первинний цілерозподіл) передбачає виконання першої ітерації цілерозподілу ресурсу рою БпЛА для ураження об'єктів групової цілі. На цьому етапі задача розв'язується з урахуванням варіанта розподілу V1 та використанням класичної постановки «задачі про призначення», яка передбачає реалізацію принципу розподілу ресурсу «один БпЛА – на один об'єкт ураження відповідного типу» у складі групової цілі.

Суть оптимізаційної задачі на цьому етапі зводиться до знаходження оптимального плану цілерозподілу так, щоб сумарний реалізований потенціал неоднорідного рою БпЛА (у нашому випадку – сумарної маси БЧ ударних БпЛА, розподілених по об'єктах) був максимальним, що для узагальненого випадку може бути записано цільовою функцією:

інтерпретації потребує залежність умовної маси БЧ БпЛА $m_i(d_{ij})$ та коефіцієнта блокування d_{ij} . Проте задача (за умов цілочисельності аргументів) може бути частковим випадком задач цілочисельного програмування, для розв'язання яких потрібно зводити задачу до класичного виду. Формалізація залежності $m_i(d_{ij})$ перетворює сформульовану задачу на відому задачу лінійного програмування з цілочисельними обмеженнями [15].

Процес блокування призначення можна формалізувати на підставі урахування умов варіанта розподілу БпЛА на об'єкти ураження (V1) та введення симетричної діагональної матриці блокування:

$$D_{m \times n} = \|d_{ij}\| = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_m\} = \begin{vmatrix} d_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & d_{nm} \end{vmatrix}, \quad (5)$$

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \forall i = j, \\ 0, & \forall i \neq j. \end{cases}$$

З (4) видно, що показник $m_i(d_{ij})$ може приймати значення $m_i(d_{ij}) \in \{m_i; 0\}$. Але очевидно, що БпЛА i -го типу, для якого не виконуються жорсткі умови варіанту розподілу V1, фізично не може бути призначений на об'єкт j -го типу, якщо $i \neq j$. Для таких БпЛА $m_i(d_{ij}) = m_i \cdot d_{ij} = 0$. У цьому випадку всі аргументи $x_{ij} = d_{ij}$, а цільова функція (3) прийматиме класичний вигляд:

$$X^{(1)} = \|x_{ij}\| = i \begin{vmatrix} d_{11} & d_{11} & \dots & - & d_{1n} & d_{1n} & \dots \\ d_{11} & d_{11} & \dots & - & d_{1n} & d_{1n} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & - & \dots & \dots & \dots \\ - & - & - & - & - & - & - \\ d_{m1} & d_{m1} & \dots & - & d_{mn} & d_{mn} & \dots \\ d_{m1} & d_{m1} & \dots & - & d_{mn} & d_{mn} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & - & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & - & 0 & 0 & \dots \\ 1 & 1 & \dots & - & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & - & \dots & \dots & \dots \\ - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & \dots & - & 1 & 1 & \dots \\ 0 & 0 & \dots & - & 1 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & - & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Слід зауважити, що оскільки час розв'язання задачі пропорційний числу агентів рою, а відомі алгоритми засновані на ітераційних процедурах, які теж потребують певного часу, запропоноване врахування блокувань призначень у задачі цілерозподілу дозволяє скоротити кількість ітерацій (обернено пропорційно до розмірності задачі), що сприятиме підвищенню оперативності розрахунків. Таким чином, перша ітерація дозволяє оптимально розподілити ресурс рою ударних БпЛА по об'єктах групової цілі. Проте, як зазначено вище, в реальних умовах ураження всіх об'єктів групової цілі за повної витрати ресурсу рою є малоімовірним. У випадку залишку ударних БпЛА ($\Delta P_1 = P - P_1 > 0$) та наявності неуразених об'єктів групової цілі ($N_j > 0$), що може бути визначено на етапі реконфігурації рою [3], слід перейти до наступних ітерацій (етапів) цілерозподілу.

Етап 4 (вторинний цілерозподіл). Оскільки на етапі 3 враховувалась жорстка умова цілерозподілу за варіантом V1 ($i \rightarrow j$), усі БпЛА, що їй відповідають, вважаються оптимально призначеними (витраченими) і з подальшого цілерозподілу виключаються, а задача стає несиметричною та незбалансованою, $\{m \neq n\} \vee \{i \rightarrow j + a\} \vee \{i \rightarrow j - a\}, a \in \mathbb{N}$. Відповідно до прийнятих умов її подальше розв'язання здійснюється з урахуванням пріоритетів варіантів розподілу V4 > V2.

Згідно з пріоритетним варіантом V4 декілька «легких» БпЛА призначаються на більш важкий (більш складний) об'єкт групової цілі ($i \rightarrow j+1, 2, \dots$). Тобто приймається, що БпЛА i -го типу можуть об'єднуватись в суброї, а сукупність їх БЧ за одночасного застосування по одному об'єкту j -го типу групової цілі забезпечить ураження цього об'єкта. Для збереження ідеології типової «задачі про призначення» об'єднання декількох БпЛА можна представити як субрій k -го типу. Сумарна маса БЧ БпЛА i -их типів, об'єднаних у субрій k -го типу, становитиме:

$$P_1 = \sum_i \sum_j m_{ij} \cdot d_{ij} \rightarrow \max. \quad (6)$$

У результаті першої ітерації цілерозподілу ресурсу рою БпЛА для ураження об'єктів групової цілі отримуються:

1. Реалізований потенціал рою БпЛА P_1 (у нашому випадку – сумарної маси БЧ ударних БпЛА, розподілених по об'єктах за варіантом V1).

2. Матриця призначень:

$$m_k = \lfloor \sum_i m_i \rfloor_k = m_j, \forall m_i < m_{oj}. \quad (8)$$

Якщо у результаті реконфігурації рою після первинного цілерозподілу його ресурсу залишилась значна частина БпЛА різних i -их типів ($N_i \geq 2$), логічно припустити, що умові (8) відповідатимуть декілька варіантів суброїв k -го типу ($k \in \mathbb{Z}_{\geq 1}$), у яких інтегруватимуться БЧ БпЛА різних типів. У цьому випадку кількість типів суброїв БпЛА, а також можлива кількість цих типів (K) може бути визначена із застосуванням методів комбінаторного аналізу. Оскільки за умови (8) можуть бути використані БпЛА як одного, так і різних типів, доцільно скористатись формулою для визначення числа сполучень з повтореннями. Тоді з урахуванням визначених вище умов і обмежень задача формулюється таким чином: є i груп (типів) БпЛА, в кожній з яких залишилось не більше n_1, n_2, \dots, n_i однакових ударних БпЛА. Треба визначити кількість всіх сполучень з повтореннями за умови, що з кожної групи можна обрати не менше двох БпЛА, тобто з кожної групи – від s_i до n_i БпЛА ($2 \geq s_i \geq n_i$). Для таких обмежень:

$$K = \prod_{i=1}^m (n_i - s_i + 1). \quad (9)$$

Отримана кількість типів суброїв БпЛА може бути значною, проте вона обмежується умовою (8), що спрощує побудову варіантів суброїв k -го типу (як комбінацій БпЛА i -их типів), кожний з яких характеризується параметром m_k . Крім того, умова (8) виключає необхідність введення блокування призначень, як це було здійснено на етапі 3.

З урахуванням отриманих варіантів суброїв ударних БпЛА частку потенціалу (ресурсу) рою БпЛА, що витрачається при вторинному цілерозподілі (етап 4), може бути знайдено в результаті розв'язання оптимізаційної задачі:

$$P_2 = F(m_k, x_{kj}) = \sum_k \sum_j m_{kj} \cdot x_{kj} \rightarrow \max \quad (10)$$

за умови виконання обмежень:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n x_{kj} \leq \sum_{k=1}^K N_k, \\ \sum_{k=1}^K x_{kj} = x_{1j} + x_{2j} + \dots + x_{Kj} \leq 1, \forall j = \overline{1, n}, \\ \sum_{j=1}^n x_{kj} = x_{k1} + x_{k2} + \dots + x_{kn} \leq 1, \forall k = \overline{1, K}, \\ x_{kj} \in \{0; 1\}, \end{cases} \quad (11)$$

де x_{kj} – цілочисельний аргумент ухвалення рішення про призначення суброю k -го типу на об'єкт ураження j -го типу у складі групової цілі;

N_k – наявний ресурс (кількість суброїв ударних БпЛА k -го типу у рою).

У результаті другої ітерації цілерозподілу ресурсу рою БпЛА для ураження об'єктів групової цілі отримуються:

1) Реалізований потенціал рою БпЛА P_2 (у нашому випадку – сумарної маси БЧ ударних БпЛА, розподілених по об'єктах за варіантом V4.

2) Матриця призначень:

$$X^{(2)} = \|x_{kj}\|, k = \overline{1, K}, j = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Етап 5 (третинний цілерозподіл). Оскільки в результаті попередніх етапів цілерозподілу більш легкі типи БпЛА будуть призначені для ураження відповідних та більш важких (більш складних) об'єктів групової цілі, може залишитись частка невикористаного ресурсу рою. У разі виконання

умови $N_i > N_{j-a}$, $a \in \mathbb{N}$ у цій ітерації застосовується наступний за пріоритетом варіант V2. Відповідно до нього БпЛА i -го типу з БЧ масою m_i мають призначатись на більш легкий (більш простий) об'єкт групової цілі (умова $i \rightarrow j - a$, $a \in \mathbb{N}$), що забезпечує його безумовне ураження. Таке призначення є припустимим, але не раціональним з точки зору використання ресурсу, адже маса БЧ БпЛА i -го типу буде надмірною для ураження j -а-го типу об'єкта ($m_i > m_{j-a}$) групової цілі. У цьому випадку з початкової маси БЧ БпЛА m_i буде ефективно використано лише частку (m_{j-a}). Решту маси БЧ $\Delta m_i = m_i - m_{j-a}$ буде витрачено без заподіяння шкоди іншим об'єктам противника (ефект множинного ураження декількох об'єктів не розглядається). Тоді, з урахуванням зазначених умов, частку потенціалу рою БпЛА, що витрачається при третинному цілерозподілі (етап 5), може бути знайдено в результаті розв'язання оптимізаційної задачі:

$$P_3 = F(m_i, m_{j-a}, x_{ij-a}) = \sum_i \sum_{j-a} m_{ij-a} \cdot x_{ij-a} \rightarrow \max \quad (13)$$

за умови виконання обмежень:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n x_{ij-a} \leq \sum_{i=1}^K N_i, \\ \sum_{i=1}^K x_{ij-a} \leq 1, \forall j = \overline{1, n}, \\ \sum_{j=1}^n x_{ij-a} \leq 1, \forall i = \overline{1, m}, \\ x_{ij-a} \in \{0; 1\}, \end{cases} \quad (14)$$

Отже, на основі наведених ітераційних процедур «задачі про призначення» може бути вирішено проблему цілерозподілу неоднорідного рою ударних БпЛА. При цьому логіка «задачі про призначення» залишається збереженою, а відомі обмеження не порушуються. Новизна розробленого методу полягає у використанні ітераційних процедур відомої оптимізаційної задачі з її зведенням до класичної постановки, що дозволяє знаходити максимально наближений до оптимального план розподілу

неоднорідних засобів (ударних БпЛА) по різномірних об'єктах групової цілі. Часткова втрата оптимальності пов'язана з цілочисельністю задачі та частковим ігноруванням частки БЧ БпЛА, що видно з умови (8). Проте оптимальність забезпечується евристично обраними пріоритетами варіантів розподілу БпЛА рою $V1 > V4 > V2$, що й було враховано на етапах 3–5.

Додатково, відповідно до логіки удосконаленої методики, на *етані 6* визначаються показники

використання ресурсу рою ударних БпЛА та здійснюється узагальнення результатів цілерозподілу. Зокрема, визначаються:

1) Використаний потенціал (ресурс) рою ударних БпЛА (сумарна використана маса БЧ):

$$P_B = \sum_{s=1}^3 P_i \quad (15)$$

де s – номер ітерації цілерозподілу.

2) Залишок потенціалу (ресурсу) рою БпЛА (невикористана маса БЧ):

$$\Delta P = P - P_B = P - \sum_{i=1}^3 P_i \quad \text{або} \quad \delta P = \frac{P - P_B}{P} \cdot 100\%. \quad (16)$$

3) Залишок неуражених об'єктів j -го типу групової цілі після ітерацій первинного, вторинного і третинного цілерозподілу $N_{nj}^{(s)}$. Показник може змінюватись залежно від варіантів початкового співвідношення кількості БпЛА i -их типів та об'єктів j -го типу групової цілі ($m=n$, $m>n$, $n>m$) і має відповідати загальній для всіх s -ітерацій умові:

$$N_{nj}^{(s)} \leq \sum_j N_j. \quad (17)$$

Після першої ітерації цілерозподілу ударних БпЛА рою (за варіантом V1, відповідно до умови $i \rightarrow j, m_i = m_j$) залишок неуражених об'єктів j -го типу групової цілі становитиме:

$$N_{nj}^{(1)} = N_j - N_j^{(1)} = N_j - \sum_j x_{ij}^{(1)}, \forall x_j = 1 \quad (18)$$

де $N_j^{(1)}$ – кількість уражених об'єктів j -го типу

групової цілі в результаті первинного цілерозподілу.

За аналогією визначається залишок неуражених об'єктів j -го типу групової цілі після ітерацій вторинного і третинного цілерозподілу:

$$N_{nj}^{(2)} = N_{nj}^{(1)} - N_{nj}^{(2)} = N_{nj}^{(1)} - \sum_j x_{ij}^{(2)}, \forall x_j = 1; \quad (19)$$

$$N_{nj}^{(3)} = N_{nj}^{(2)} - N_{nj}^{(3)} = N_{nj}^{(2)} - \sum_j x_{ij-a}^{(3)}, \forall x_{j-a} = 1, \quad (20)$$

де $N_j^{(2)}, N_j^{(3)}$ – відповідно кількість уражених об'єктів j -го типу групової цілі в результаті ітерацій вторинного і третинного цілерозподілу.

Загальний залишок неуражених об'єктів групової цілі після трьох ітерацій цілерозподілу становитиме:

$$N_{nj}^{(3)} \leq \sum_j N_{oj} \quad (21)$$

4) Рациональний варіант цілерозподілу рою ударних

БпЛА $\{X^{(1)}, X^{(2)}, X^{(3)}\}$, які були отримані на етапах 3–5 у вигляді відповідних матриць призначення.

Отже, шляхом ітераційних процедур типової оптимізаційної «задачі про призначення» здійснюється цілерозподіл неоднорідного рою ударних БпЛА по різномірних об'єктах групової цілі противника. Отриманий план цілерозподілу є близьким до раціонального, що забезпечується шляхом послідовного використання запропонованих варіантів призначення неоднорідного рою ударних БпЛА i -го

типу на j -ті типи об'єктів відповідно до їхніх пріоритетів. Такий підхід не суперечить умовам та обмеженням «задачі про призначення» та дає змогу максимально повно розподілити ресурс рою БпЛА.

Крім того, з рис. 1 видно, що у разі неповного ураження об'єктів групової цілі та залишку ресурсу рою, який не може бути використано для цього (умова $(N_j > 0) \vee (\Delta P_3 > 0)$), метод передбачає можливість уточнення завдання щодо призначення залишків ударних БпЛА рою на виконання іншої задачі, що потребуватиме введення нових або коригування існуючих вхідних даних.

Для перевірки логіки та працездатності методу проведено серію розрахунків.

Приклад 1. Оскільки кожна ітерація передбачає зведення постановки задачі до класичного вигляду, наведемо спочатку приклад першої ітерації.

Нехай у складі неоднорідного рою маємо три типи ударних БпЛА ($m=3$, умовно «легкі», «середні» і «важкі») у кількості ($N_1=5, N_2=3, N_3=2$), які відповідно оснащені БЧ масою $m_1=1$ кг, $m_2=3$ кг, $m_3=8$ кг. Зазначений рій БпЛА призначається для ураження об'єктів групової цілі противника, яка містить три типи об'єктів ($n=3$, умовно «незахищені», «легкоброньовані», «броньовані») у кількості $N_{o1}=4, N_{o2}=6, N_{o3}=2$. У спрощеному варіанті вважаємо, що для ураження «незахищених» об'єктів достатньо маси БЧ $m_{o1}=1$ кг, $m_{o2}=3$ кг, $m_{o3}=8$ кг. Усі об'єкти групової цілі виявлені, не мають пріоритетів і знаходяться в межах досяжності для всіх ударних БпЛА рою. Втрат БпЛА унаслідок вогневої або радіоелектронної протидії противника немає ($k_b=0$). Необхідно визначити оптимальний план цілерозподілу неоднорідного рою ударних БпЛА для ураження об'єктів групової цілі.

Розв'язання задачі. Відповідно до етапу 2 за формулою (2) розраховується потенціал (ресурс) рою ударних БпЛА, який становить $P = m_1 N_1 + m_2 N_2 + m_3 N_3 = 30$ кг.

Згідно із визначеними пріоритетами призначень розв'язується задача первинного цілерозподілу рою ударних БпЛА за варіантом V1 (призначення БпЛА i -го типу для гарантованого ураження об'єкта j -го типу, $i \rightarrow j, m_i = m_{oj}$). З урахуванням обмежень, що задаються матрицею блокування (5), розв'язується оптимізаційна задача (3) з обмеженнями (4), на підставі чого:

а) формується матриця призначень для першої ітерації цілерозподілу:

$$X^{(1)} = \|x_{ij}\|$$

i \ j		N _{o1} =4				N _{o2} =6						N _{o3} =2	
		M _{o1}	M _{o1}	M _{o1}	M _{o1}	M _{o2}	M _{o2}	M _{o2}	M _{o2}	M _{o2}	M _{o2}	M _{o3}	M _{o3}
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N ₁ =5	M ₁	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	M ₁	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	M ₁	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	M ₁	4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	M ₁	5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
N ₂ =3	M ₂	6	0	0	0	3	3	3	3	3	3	0	0
	M ₂	7	0	0	0	3	3	3	3	3	3	0	0
	M ₂	8	0	0	0	3	3	3	3	3	3	0	0
N ₃ =2	M ₃	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	8
	M ₃	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	8

б) визначається частка витраченого потенціалу рою: $\Pi_1 = F(m_i(d_{ij}), x_{ij})$.

$$\Pi_1 = F(m_i(d_{ij}), x_{ij}) = \sum_i \sum_j m_{ij}(d_{ij}) \cdot x_{ij} = m_{11} \cdot 1 + m_{22} \cdot 1 + m_{33} \cdot 1 + m_{44} \cdot 1 + m_{65} \cdot 1 + m_{76} \cdot 1 + m_{87} \cdot 1 + m_{9-11} \cdot 1 + m_{10-12} \cdot 1 = 29 \text{ кг}$$

Результати цілерозподілу та оцінка залишку ресурсу БпЛА рою $\Delta\Pi_1 = \Pi - \Pi_1 = 1 \text{ кг}$ показують, що ресурс використано майже повністю. З початкового складу рою залишився лише один «легкий» БпЛА з масою БЧ $m_1=1 \text{ кг}$, чого недостатньо для ураження залишку групової цілі противника, зокрема трьох «легкоброньованих» об'єктів. Оскільки умова $\Delta\Pi_1, N_j > 0$ не виконується, відповідно до логіки методу (рис. 1) наступні ітерації вторинного та третинного цілерозподілу не можуть бути проведені. Тому здійснюється перехід до етапу 6, де відповідно до виразів (15), (16) і (18) визначаються показники використання ресурсу рою ударних БпЛА та узагальнюються результати цілерозподілу. Зокрема визначаються: використаний потенціал (ресурс) рою $\Pi_B = \Pi_1 = 29 \text{ кг}$; залишок потенціалу (ресурсу) рою $\Delta\Pi = \Delta\Pi_1 = \Pi - \Pi_1 = 1 \text{ кг}$, $\delta\Pi = 3,3\%$; залишок неуразених об'єктів j -го типу групової цілі після ітерацій первинного цілерозподілу $\{N_1^{(1)} = 0, N_2^{(1)} = 3, N_3^{(1)} = 0\}$. Тобто, з початкового складу групової цілі противника після цілерозподілу ресурсу рою БпЛА залишаться неуразеними три «легкоброньовані» об'єкти. При цьому жоден з них не може бути уражений БпЛА «легкого» типу, один з яких залишиться не призначеним. Рациональний варіант цілерозподілу рою ударних БпЛА для заданого прикладу наочно продемонстрований наведеною вище

матрицею призначень для першої ітерації цілерозподілу.

Приклад 2. Нехай після першої ітерації цілерозподілу та реконфігурації рою БпЛА є залишок ресурсу ($N_1=5, N_2=0, N_3=0$). Також неуразеними залишилися «легкоброньовані» та «броньовані» об'єкти ($N_{o1}=0, N_{o2}=2, N_{o3}=2$). Умови ураження об'єктів такі самі, як і у першому прикладі. Тобто маємо умови задачі вторинного цілерозподілу рою ударних БпЛА за варіантом V4 (призначення декількох «легких» БпЛА i -го типу на більш важкий (більш складний) об'єкт j -го типу групової цілі, $i \rightarrow j + a, \sum_i m_i \geq m_{oj}$), яка розв'язується на етапі 4.

За таких умов очевидно, що залишок ресурсу БпЛА рою після першої ітерації цілерозподілу при $m_1=1 \text{ кг}$ становить $\Delta\Pi_1 = m_1 \cdot N_1 = 5 \text{ кг}$. З урахуванням обмежень $i \rightarrow j + a, \sum_i m_i \geq m_{oj}$ і $2 \geq s \geq n_i$ цей

залишок ресурсу можна розділити на суброї k -го типу:

$k=1$ – субрій, у якому об'єднано три БпЛА першого типу з сумарною масою БЧ $m_k=3m_1=3 \text{ кг}$;

$k=2$ – субрій, у якому об'єднано два БпЛА першого типу з сумарною масою БЧ $m_k=2m_1=2 \text{ кг}$.

Тоді, відповідно до логіки етапу вторинного цілерозподілу рою ударних БпЛА за варіантом V4 можна перетворити матрицю призначення $X^{(2)} = \|x_{kj}\|, k = \overline{1,2}, j = \overline{1,4}$.

i \ j		N _{o2} =2		N _{o3} =2	
		M _{o2}	M _{o2}	M _{o3}	M _{o3}
		1	2	3	4
N ₁ =5	M ₁	1			
	M ₁	2			
	M ₁	3			
	M ₁	4			
	M ₁	5			



k \ j		N _{o2} =2		N _{o3} =2	
		M _{o2}	M _{o2}	M _{o3}	M _{o3}
		1	2	3	4
N ₁ =1	3M ₁	1			
N ₁ =1	2M ₁	2			

Результат розв'язання задачі є очевидним – перший субрій (три БпЛА «легкого» типу) буде призначений на один «легкоброньований об'єкт», а другий, враховуючи задані умови і обмеження, залишиться невикористаним. Отже, після другої ітерації цілерозподілу використаний потенціал (ресурс) рою становитиме $L_B=3$ кг, а залишок ресурсу становитиме $\Delta P_2 = \Delta P_1 - P_b = \Delta P_1 - m_k \cdot N_k = 5 \text{ кг} - 3 \text{ кг} = 2 \text{ кг}$.

Залишок неуражених об'єктів j -го типу групової цілі після ітерації вторинного цілерозподілу: $\{N_1^{(2)} = 0, N_2^{(2)} = 1, N_3^{(2)} = 2\}$.

Тобто, після вторинного цілерозподілу ресурсу рою БпЛА залишаються неураженими один «легкоброньований» об'єкт і два «броньовані». При цьому жоден з них не може бути уражений суброєм k -го типу ($k=2$), сумарна маса БЧ якого є недостатньою для ураження подібних об'єктів.

Слід зазначити, що наводити приклад для третинного цілерозподілу (для умови $i \rightarrow j - a, m_i > m_{oj}$) не має сенсу, адже за наведеною у методі логікою ця ітерація також зводиться до типової постановки задачі про призначення з урахуванням часткового використання маси БЧ БпЛА «важкого» типу при ураженні більш простих об'єктів групової цілі.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Отже, у статті запропоновано метод, який дає змогу вирішувати завдання динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів по різномірних об'єктах групової цілі на основі ітераційних процедур класичної «задачі про призначення». При цьому показано, що ітерації можуть базуватись на запропонованих варіантах призначення неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів i -го типу на j -ті типи об'єкта відповідно до їхніх пріоритетів. Метод допомагає здійснювати розподіл ударних безпілотних літальних апаратів N_i по N_{oj} об'єктах за умов, коли кількість ударних безпілотних літальних апаратів не відповідає кількості об'єктів групової цілі противника, тобто коли $N_i \neq N_j$ (варіант несиметричного конфлікту «неоднорідний рій безпілотних літальних апаратів – різномірні об'єкти противника»).

Новизна методу полягає у використанні ітераційних процедур типової «задачі про призначення» для раціонального використання ресурсу рою ударних безпілотних літальних апаратів,

Список бібліографічних посилань

1. Мосов С. П. Роїння дронів військового призначення: реалії та перспективи. *Зб. наук. пр. Центру військово-стратегічних досліджень Нац. ун-ту оборони України*. 2024. № 1 (80). С. 77–86. DOI: 10.33099/2304-2745/2024-1-80/77-86.
2. Волонтерка. Думки залізного генерала. URL: <https://dl-news.defence-line.org/?p=57440&sfnsn=mo> (дата звернення: 05.05.2025).
3. Шовкошитний І. І., Василенко О. А.

а також можливості врахування під час моделювання несиметричного конфлікту «неоднорідний рій безпілотних літальних апаратів – різномірні об'єкти противника»:

коефіцієнта втрат безпілотних літальних апаратів (k_b) унаслідок вогневої або радіоелектронної протидії противника;

залишку потенціалу (ресурсу) рою ударних безпілотних літальних апаратів після кожної ітерації цілерозподілу;

залишку неуражених об'єктів групової цілі після ітерацій первинного, вторинного і третинного цілерозподілу.

Логіка та працездатність методу підтверджена розрахунками.

Перспективними напрямками подальших досліджень можуть бути:

розроблення відповідних алгоритмів для програмної реалізації розробленого методу цілерозподілу неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів по різномірних об'єктах групової цілі противника;

оцінювання та порівняння оптимальності варіантів задачі динамічного цілерозподілу рою ударних безпілотних літальних апаратів по різномірних об'єктах противника.

У науковому плані інтерес становлять задачі розподілу ресурсу рою безпілотних літальних апаратів на основі варіантів постановок оптимізаційної задачі про рюкзак, зокрема, задачі про мультирюкзак (множинний рюкзак), яка, за попереднім прогнозом, потребуватиме меншого обчислювального ресурсу та дасть змогу більш оперативно знаходити оптимальний план цілерозподілу рою ударних безпілотних літальних апаратів по різномірних об'єктах групової цілі противника. Крім того, необхідно дослідити можливість застосування для вирішення проблеми цілерозподілу неоднорідного рою БпЛА специфічних постановок задач, зокрема, «загальної задачі про призначення» або «задачі спільного призначення».

Подальше удосконалення методу може здійснюватися завдяки урахуванню додаткових обмежень на призначення (відстань, імовірність ураження, протидія противника, запас ресурсу безпілотних літальних апаратів рою тощо). Варіантом удосконалення методу також може бути врахування можливості застосування інших типів безпілотних літальних апаратів (наприклад, безпілотні літальні апарати зі скидами).

- Проблемні питання ройового застосування ударних безпілотних літальних апаратів. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ. НУОУ. 2023. № 3(48). С. 27–34. DOI:10.33099/2311-7249/2023-48-3-27-34.
4. 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. **5. Таршин В. А., Компанієць О. М., Котляренко С. С., Дужий Р. В.** Розвиток методології управління роями БпЛА на основі ройового інтелекту. *Зб. наук. пр. Держ. наук.-досл. ін-ту авіації*. 2023. Вип. 19 (26). С. 109–115. DOI: 10.54858/dndia.2023-19-15. **6. Єрофєєва В. О.** Управление роём динамических объектов на базе мультиагентного подхода. URL: <https://surl.li/grmsgo> (дата звернення: 05.05.2025). **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. 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. **9. Пащенко Т. П.,**

Микусь С. А., Солонніков В. Г. та ін. Методи моделювання бойових дій військ (сил). навч. посіб. Київ : НУОУ ім. Івана Черняхівського, 2021. 272 с. **10. Гузченко С., Поплавець С., Гатченко Є., Явтушенко В., Козлов Д., Дроль О.** Визначення розподілу різномірних засобів протиповітряної оборони по ураженню повітряних цілей. *Науковий збірник «InterConf»*. Vilnius, Lithuania. 2023. № 145. С. 430–438. **11. Кормен Т. Х., Лейзерсон Ч. Е., Рівест Р. Л., Стайн К.** Алгоритми: побудова та аналіз (3-тє вид., пер. з англ.). Київ : Діалектика, 2021. 1312 с. **12. Вагнер Г.** Основы исследования операций. В 3 т. Т. 2. Москва : Мир, 1975. 496 с. **13. Лавров Є. А.** Математичні методи дослідження операцій: підручник / Є. А. Лавров, Л. П. Перхун, В. В. Шендрік та ін. Суми: Сумський держ. ун-тет, 2017. 212 с. **14. Степанюк В. В.** Методи математичного програмування. Київ: Вища школа, 1977. 272 с. **15. Юдин Д. Б., Гольштейн Е. Г.** Задачи и методы линейного программирования. Москва : Сов. радио, 1961. 383 с.

METHOD OF DYNAMIC TARGETING OF A HETEROGENEOUS SWARM OF STRIKING UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED ON ITERATIVE PROCEDURES OF «ASSIGNMENT PROBLEM»

SHOVKOSHYTNYI Ihor, Doctor of Military Science, Senior Research Fellow, 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 presents a method of dynamic targeting of a heterogeneous swarm of attack unmanned aerial vehicles, based on iterative procedures of the «assignment problem» over heterogeneous objects of the enemy's group target. The method considers various variants of asymmetric conflict scenarios «heterogeneous swarm of unmanned aerial vehicles – heterogeneous objects of the enemy's group target», as well as limitations associated with the loss of swarm resources, the priority of enemy targets and rapid changes in the combat situation. Several limitations and assumptions are identified, and based on a heuristic approach, options for the distribution of uncrewed aerial vehicles of a heterogeneous swarm to heterogeneous objects of the enemy's group target are formed, as well as their priorities are substantiated, which is taken into account when formalising the targeting problem. It is shown that the logic of the «assignment problem» remains preserved at all stages of the method, and the known constraints are not violated. **The purpose of the article** is to develop a method for dynamic target distribution of a heterogeneous swarm of strike unmanned aerial vehicles based on iterative procedures of the 'assignment problem' for heterogeneous objects of the enemy's group target.

Research methods. In writing the article, the following methods were used: general scientific methods (analysis, comparison), provisions of the systematic approach, methods of combinatorial analysis, optimisation methods, in particular, one of the problems of linear integer programming.

Literature review. The analysis of scientific sources on the chosen topic shows that the methods used cannot be used to solve the problem of targeting a heterogeneous swarm of attack unmanned aerial vehicles at heterogeneous objects of the enemy's group target without additional adaptation. Alternatively, the problem can be solved by using iterative procedures and a standard calculation procedure provided by the well-known «assignment problem», the features of which are discussed in the article.

Research results. The authors have developed a method that allows solving the problem of targeting heterogeneous swarms of attack uncrewed aerial vehicles at heterogeneous objects of the enemy's group target due to the use of iterative procedures of the «assignment problem» with the consistent use of the proposed options for assigning a heterogeneous swarm of attack uncrewed aerial vehicles to heterogeneous objects by the priorities of these options; the distribution of attack uncrewed aerial vehicles to objects in an asymmetric conflict «heterogeneous swarm of unmanned aerial vehicles - heterogeneous enemy objects»). The problem is formalised, and a generalised scheme of the method is proposed. A series of calculations demonstrates the effectiveness of the proposed dynamic targeting method of a heterogeneous swarm of attack uncrewed aerial vehicles based on iterative procedures of the «assignment problem».

Research novelty. The novelty of the method lies in the use of iterative procedures of a typical optimisation «assignment problem» for the rational use of the resource of strike uncrewed aerial vehicles with a comprehensive consideration of various scenarios of asymmetric conflict «heterogeneous swarm of unmanned aerial vehicles – heterogeneous objects of the enemy's group target»; the coefficient of unmanned aerial vehicles losses due to enemy fire or electronic countermeasures; the remaining potential (resource) of the swarm of strike unmanned aerial vehicles after

each iteration of targeting; the remaining unaffected objects of the group target after iterations of primary, secondary and tertiary targeting.

Theoretical and practical significance. A method for solving the problem of heterogeneous resource allocation based on the classical «assignment problem» with the sequential use of resource allocation options according to their priorities (under conditions when the number of resources (attack unmanned aerial vehicles) does not correspond to the number of targets) is proposed. The proposed method can be considered when developing models and algorithms for the swarm behaviour of heterogeneous groups of uncrewed aerial vehicles during the joint performance of tasks to detect and destroy heterogeneous objects.

Conclusions and future work. The method can be improved by considering additional constraints on the target (distance, probability of hit, enemy resistance, unmanned aerial vehicles swarm life, etc.). The method can also be improved by considering the possibility of using other types of unmanned aerial vehicles (e.g., unmanned aerial vehicles with munitions).

Key words: strike uncrewed aerial vehicles, swarm, swarm behaviour algorithms, dynamic targeting method, assignment problem, iterative procedures.

References

1. Mosov, S. P., (2024). Swarming of Military Drones: Realities and Prospects. Collection of scientific papers of the Centre for Military Strategic Studies of the National Defence University of Ukraine. 1(80), 77–86. DOI: 10.33099/2304-2745/2024-1-80/77-86.
2. Volunteer. Thoughts of the Iron General [online]. Available at: <https://dl-news.defence-line.org/?p=57440&sfnsn=mo> [Accessed: 05 May 2025].
3. Problematic issues of swarming use of striking uncrewed aerial vehicles (2023). *Modern information technologies in the field of security and defence*. Kyiv. NUOU. 3(48). С. 27–34. DOI:10.33099/2311-7249/2023-48-3-27-34.
4. Shovkoshytnyi, I., Vasilenko, O., (2024). Development of a logical and temporal model of swarm application of striking unmanned aerial vehicles taking into account typical methods of their group application in modern conditions. *Collection of scientific papers of the Centre for Military Strategic Studies of the National Defence University of Ukraine*. 3(83), 108-116. DOI: 10.33099/2304-2745/2024-3-83/108-116.
5. Tarshyn, V. A., Kompaniets, O. M., Kotliarenko, S. E., Duzhyi, R. V., (2023). Development of a methodology for managing UAV swarms based on swarm intelligence. *Collection of scientific papers of the State Research Institute of Aviation*. 19(26), 109-115. DOI: 10.54858/dndia.2023-19-15.
6. Erofeeva, V. O. Control of a swarm of dynamic objects based on a multiagent approach. [online]. Available at: <https://surl.li/grmsgo> [Accessed: 05 May 2025].
7. Zhuravska, I., (2019). Heterogeneous computer networks for critical applications based on swarms and flocks of UAVs: monograph: Petro Mohyla National University of Mykolaiv, 192.
8. Vasilenko, 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.
9. Pashchenko, T. P., Mykus, S. A., Solonnikov, V. G. et al. (2021). Methods of modeling combat operations of troops (forces). Kyiv: Ivan Chernyakhovsky National University, 272.
10. Guzchenko, S., Poplavets, S., Gatchenko, E., Yavtushenko, V., Kozlov, D., Drol, O., (2023). Determination of the distribution of heterogeneous air defence means for defeating air targets. *Scientific collection «InterConf»*. Vilnius, Lithuania. 145, 430–438.
11. Corman, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., Stein, K., (2021). Algorithms: Construction and Analysis (3rd ed., trans. from English). Kyiv: Dialectica, 1312.
12. Wagner, G. Fundamentals of operations research. In 3 vols. 2. Moscow: Mir, 1975.
13. Lavrov, E. A., (2017). Mathematical methods of operations research: a textbook / E.A. Lavrov, L.P. Perkhun, V.V. Shendrik et al. Sumy: Sumy State University, 212.
14. Stepaniuk, V. V., (1977). Methods of mathematical programming. Kyiv: Higher School, 272.
15. Yudin, D. B., (1961). Problems and methods of linear programming / D. B. Yudin, E. G. Golshtein. Moscow : Sov. radio, 383.

Рукoпис надійшов до редакції	26.05.2025
Рукoпис прийнято до друку після рецензування	08.07.2025
Дата публікації	29.08.2025