DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-35-41

УДК 623.746.8

Печененко Олег Михайлович
https://orcid.org/0009-0008-9925-3089

Національний університет оборони України, Київ, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 05.04.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 20.04.2026; Дата публікації: 17.06.2026

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА РОЗПОДІЛУ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ МІЖ ПІЛОТОВАНОЮ ТА БЕЗПІЛОТНОЮ АВІАЦІЄЮ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ З АВІАЦІЙНОГО ПРИКРИТТЯ

В умовах сучасних збройних конфліктів масове застосування противником засобів повітряного нападу різних типів вимагає концептуально нових підходів до організації підсистеми авіаційного прикриття в системі протиповітряної оборони, а особливо перегляду існуючих алгоритмів цілерозподілу. Традиційні засоби (винищувачі, наземні комплекси ППО) за досвідом російсько-української війни є критично перевантаженими, що зумовлює необхідність спільного залучення пілотованої та безпілотної авіації. Існує гостра потреба у зміні підходів до протидії засобам повітряного нападу противника: від класичної задачі максимізації шкоди до задачі мінімізації вартості перехоплення за умови виконання вимог критерію відбиття нальоту. Метою дослідження є удосконалення методики розподілу повітряних цілей, яка дозволить під час цілерозподілу враховувати ефективність застосування безпілотних літальних апаратів та вертольотів. Математичний апарат, що використовується у статті ґрунтується на методах цілочисельного динамічного програмування. У роботі описано покроковий алгоритм цілерозподілу із застосуванням методу гілок і меж, який гарантовано знаходить глобальний оптимум для цілочисельних задач, а також враховує просторово-часові обмеження. Дослідження довело, що на масовані удари дешевими безпілотними літальними апаратами алгоритм автоматично призначає безпілотні літальні апарати – перехоплювачі та вертольоти, зберігаючи ресурс винищувачів та авіаційних засобів ураження для перехоплення крилатих ракет.

Ключові слова: *російсько-українська війна; протиповітряна оборона; засоби повітряного нападу; авіаційне прикриття; безпілотні літальні апарати; БпЛА-перехоплювач; планування; цілерозподіл; ефективність; бойові дії.*

Вступ

Досвід сучасних бойових дій та протиповітряної оборони (ППО) [1,2], особливо російсько-української війни демонструє масове застосування противником дешевих ударних безпілотних літальних апаратів (БпЛА) та дорогих крилатих ракет, що створює значне навантаження на систему ППО [3]. Традиційні засоби (винищувальна авіація, зенітні ракетні війська та підрозділи ППО Сухопутних військ) виявляються критично перевантаженими. Особливо гостро ця проблема постає під час протидії роям різнотипних ударних безпілотних апаратів, що вимагає залучення адаптивних алгоритмів та елементів штучного інтелекту [4]. Це зумовлює об'єктивну необхідність залучення до завдань авіаційного прикриття в ППО альтернативних засобів, таких як вертольоти та БпЛА-перехоплювачі.

Ключовою проблемою є перевантаження підсистеми авіаційного прикриття під час масованих атак засобів повітряного нападу (ЗПН), таких як розвідувальні і ударні дрони, вертольоти, літаки та крилаті ракети противника, що вимагає залучення різних засобів протидії, а саме спільного бойового застосування пілотованої та безпілотної авіації.

Матеріали та методи

Проведемо порівняльний аналіз математичного апарату існуючого алгоритму цілерозподілу та запропонованої методики. Згідно з існуючим математичним описом алгоритму призначення винищувачів, при кожному підключенні алгоритму на кожну з обслуговуваних цілей призначається лише по одній дії [3]. Якщо дія не забезпечує необхідного вогневого впливу ціль знову надходить на обслуговування лише в наступних циклах. Вибір дії здійснюється за правилом: якщо максимальна ймовірність більша чи рівна заданій то слідує її призначення. Така логіка неминуче призводить до того, що на масову дешеву ціль алгоритм цілерозподілу призначить найдорожчий винищувач, просто тому що його ймовірність успіху є найвищою. На відміну від методів повного перебору, використання сучасних методів дослідження операцій та розв'язання задач оптимізації дозволяє гарантовано знайти глобальний оптимум, відсікаючи завідомо програшні варіанти [7,10]. Існуючі математичні моделі управління вогнем (наприклад, градієнтний метод максимального елемента) орієнтовані переважно на максимізацію математичного сподівання втрат, що завдаються противнику та не враховують вартість самого перехоплення [5,6].

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license(http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Згідно з цим алгоритмом, на кожному кроці черговий засіб призначається на ту ціль, яка дає максимальний приріст цільової функції. Це призводить до швидкого виснаження дорогого боєкомплекту винищувальної авіації під час відбиття масованих нальотів, тому вирішення задачі призначення пілотованих та безпілотних апаратів при спільному застосуванні потребує концептуально нових підходів [7].

Враховуючи зазначене вище виникає необхідність удосконалити існуючу методику цілерозподілу для отримання більш точних результатів розрахунку та спростити процедуру прийняття рішення командувача та штабу на застосування авіаційної складової в системі ППО.

Метою дослідження є удосконалення методики розподілу повітряних цілей між пілотованою та безпілотною авіацією, яка дозволить проводити розрахунки щодо мінімізація витрат наявних ресурсів з урахуванням економічних та просторово-часових обмежень [8].

Результати

Математична постановка задачі зводиться до моделі цілочисельного лінійного програмування. Завдання належить до класу задач дискретного програмування, підкласом якого є задачі цілочислового програмування, де змінні $x_{ij} \in \{0,1\}$. Нехай система ППО оперує засобами ураження (де *i=1..N*), які включають як пілотовану (винищувачі, вертольоти), так і безпілотну (БпЛА-перехоплювачі) авіацію. В свою чергу система розвідки виявила деяку кількість (де *j=1..M*) ЗПН противника, які включають БпЛА, вертольоти, літаки та крилаті ракети (КР).

Цільова функція мінімізації сумарних витрат на перехоплення залучених засобів авіації в ППО матиме вигляд:

$$L(X) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \mathrm{C}_{ij} \cdot X_{ij} \to min, \qquad (1)$$

де C_{ij} – оцінка витрат застосування *i*-го засобу по *j*-й цілі;
X_{ij} – змінна призначення *i*-го засобу на *j*-ту ціль.

Визначимо систему обмежень: По-перше, згідно з принципами планування вогню ППО, необхідно забезпечити ураження цілей так, щоб сумарна ймовірність знищення P_Σ була більшою чи рівною за задану:

$$P_\Sigma = 1 - \prod_{i=1}^{N} \left(1 - P_{ij}\right)^{X_{ij}} \geq P_{\text{визн}}^{(j)}, \qquad (2)$$

де P_{ij} – ймовірність знищення цілі одним конкретним засобом;
$P_{\text{визн}}^{(j)}$ – визначена ймовірність знищення.

По-друге, вводиться просторово-часове обмеження для уникнення “дружнього вогню”.

Для розв'язання цієї задачі розроблено удосконалений алгоритм, що базується на комбінаторному методі гілок і меж [11,13,14]. На відміну від методів повного перебору чи простих евристик, цей підхід поєднує математичну точність із розумним відсіканням, що дозволяє гарантовано знайти глобальний оптимум, не витрачаючи обчислювальні ресурси на перевірку завідомо програшних варіантів. Він ідеально підходить для задач цілерозподілу із цілочисельними обмеженнями (де неможливо виділити для перехоплення дробову частину засобу), перед якими класичні методи лінійного програмування стають безсилими [11], в свою чергу підвищує ефективність ППО. На рис. 1 представлена блок-схема запропонованої удосконаленої методики розподілу повітряних цілей між пілотованою та безпілотною авіацією під час виконання завдань з авіаційного прикриття у протиповітряній обороні.

Покроковий алгоритм удосконаленої методики розподілу пілотованої та безпілотної авіації в ППО реалізує логіку методу гілок і меж [14], через механізм нарощування зусиль та зміну класу зброї в ешелоні. Процес повторюється для кожної ідентифікованої цілі.

Крок 1. Введення вихідних даних (оцінка обстановки). Здійснюється зчитування параметрів масиву наявного складу сил та засобів авіації в системі ППО, очікуваної (прогнозованої) кількості ЗПН противника, а також задається показник потрібної ймовірності ППО [15]. Додатково фіксуються поточні метеоумови та час доби.

Крок 2. Уточнення можливостей та ешелонування засобів. Виконується розрахунок реальних ймовірностей ураження з урахуванням погоди:

$$P_{ij}^{(\text{реал})} = P_{ij}^{(\text{база})} \cdot k, \qquad (3)$$

де $P_{ij}^{(\text{база})}$ – еквівалент базової (мінімально потрібної) ймовірності знищення;
k – понижуючий коефіцієнт впливу умов середовища (день/ніч, метеоумови).

Далі застосовується економічний критерій: усі наявні засоби ураження пілотованої та безпілотної авіації розподіляються в ешелони за принципом зростання вартості їх застосування:

$$C_j \to min, \qquad (4)$$

де C_j – вартість *j*-го засобу знищення (від БпЛА до винищувача);

Алгоритм коригує ймовірності ураження з огляду на обстановку та шикує (ешелонує) доступні засоби авіації віддаючи пріоритет найдешевшим засобам (БпЛА-перехоплювачам) при атаці цілей, котрі здійснюють польоти на малих висотах і швидкостях (типу БпЛА), після перебору варіантів відбувається призначення наступного засобу при відмові першочергового засобу.

Крок 3. Ідентифікація типу ЗПН та вибір раціонального засобу ураження. Для кожної конкретної вибраної цілі алгоритм визначає її тип.

Далі накладається тактична “матриця допусків”. Залежно від швидкісних та висотних характеристик цілі (КР, літак, вертоліт, БпЛА), система фільтрує доступні класи зброї, відсікаючи завідомо неефективні або заборонені варіанти (наприклад, заборона використання БпЛА по КР).

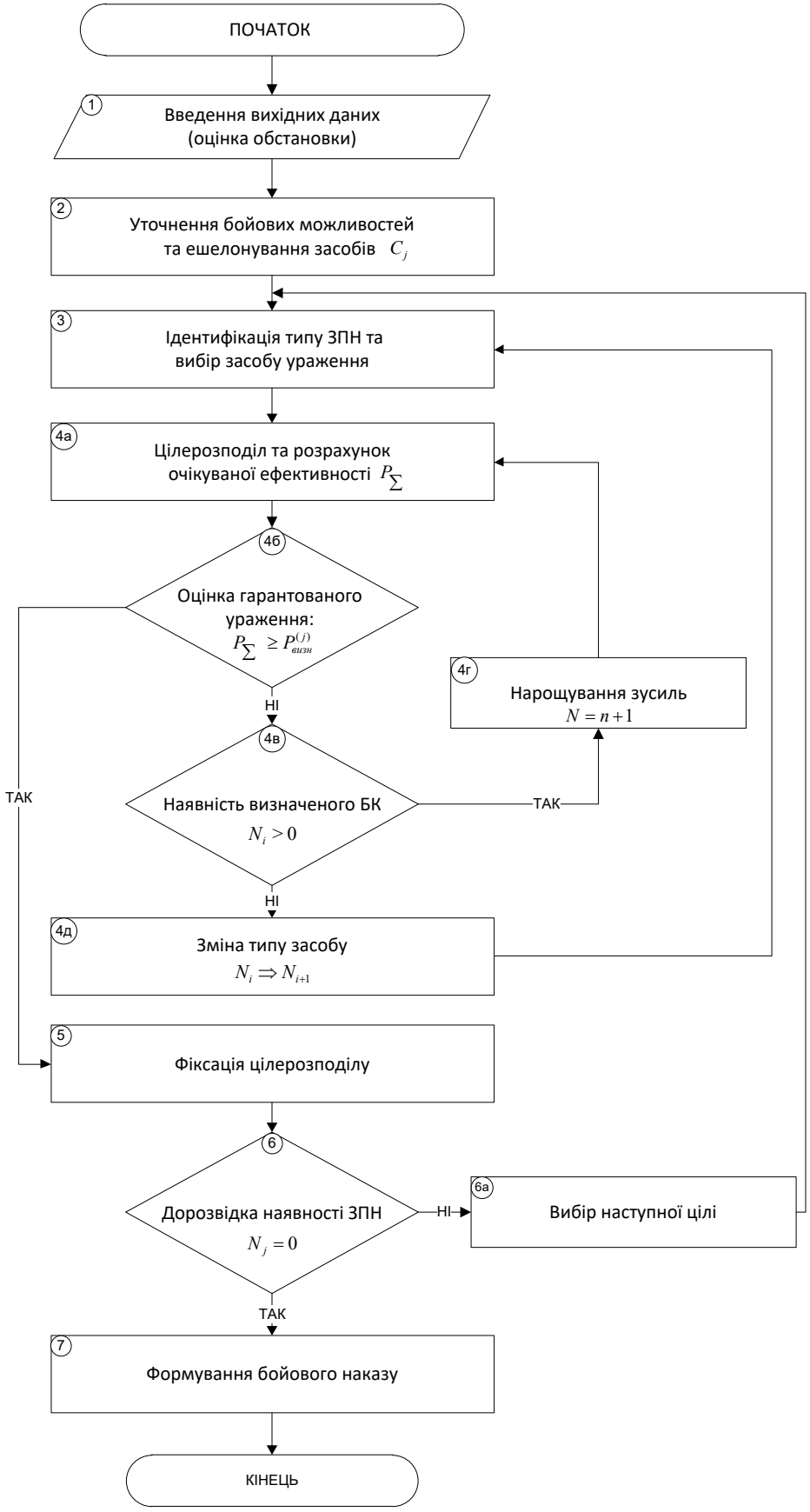

Рисунок 1 – Блок-схема удосконаленої методики розподілу повітряних цілей між пілотованою та безпілотною авіацією під час виконання завдань з авіаційного прикриття

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license(http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Крок 4а. Цілерозподіл та розрахунок очікуваної ефективності. Алгоритм віртуально (в пам'яті системи) призначає одну одиницю найдешевшого з дозволених засобів на обрану ціль. Виконується розрахунок сумарної ймовірності ураження (P_Σ) за формулою незалежних подій (2).

Крок 4б. Оцінка гарантованого ураження. Ключовий вузол прийняття рішення. Система перевіряє виконання нерівності:

$$P_\Sigma \geq P_{\text{визн}}^{(j)}, \quad (5)$$

Якщо умова виконується (ТАК): алгоритм вважає, що виділених засобів достатньо, відбувається перехід до Кроку 5.

Якщо умова не виконується (НІ): алгоритм розуміє, що треба посилити вогневий вплив і переходить до перевірки залишку боєкомплекту. поточного засобу і відбувається перехід на Крок 4в.

Крок 4в. Перевірки БК. Перевірка наявності на балансі обраного типу засобу $N_i > 0$.

Якщо умова виконується (ТАК): **Крок 4г.** Відбувається **нарощування зусиль**, алгоритм виділяє та додає ще одну одиницю цього ж засобу (наприклад, другий БпЛА на ту ж ціль) і повертається до Кроку 4а для перерахунку P_Σ.

Якщо умова не виконується (НІ): **Крок 4д.** Відбувається **зміна типу засобу ураження**, якщо ліміт дешевого засобу вичерпано, а ціль не досягла $P_{\text{визн}}^{(j)}$, алгоритм скасовує попередні віртуальні призначення, повертаючи БК на баланс. Відбувається перехід до наступного в ешелоні (потужнішого/дорожчого) засобу, після чого процес повертається на Крок 4а.

Крок 5. Фіксація цілерозподілу. При досягненні заданої ймовірності $P_{\text{визн}}^{(j)}$ віртуальний розподіл переводиться у статус остаточного. БК безповоротно списується з балансу. Програма переходить до наступного кроку.

Крок 6. Дорозвідка наявності ЗПН. Якщо в системі залишилися цілі, які не були визначені до ураження, алгоритм має здійснити вибір наступного ЗПН N_i з черги до повного опрацювання всіх цілей ($N_i = 0$.) для успішного виконання завдань ППО.

Якщо умова не виконується (НІ): **Крок 6а.** Алгоритм здійснює вибір наступної цілі, повертаючись на Крок 3 для обробки нового ЗПН.

Якщо умова виконується (ТАК): **Крок 6б.** Усі цілі розподілені, основний цикл оптимізації завершено, перехід до фінального етапу.

Крок 7. Формування бойового наказу. Система генерує фінальну матрицю цілерозподілу, яка містить чіткі цілевказівки для пілотованої та безпілотної авіації. Ця матриця є основою для автоматизованої видачі бойових наказів розрахункам та екіпажам. Завершення роботи алгоритму.

Для перевірки удосконаленої методики цілерозподілу щодо ефективності системи ППО було проведено обчислювальний експеримент, який моделював відбиття засобами пілотованої та безпілотної авіації змішаного масованого нальоту. У ході моделювання класичний метод, орієнтований виключно на максимізацію завданої шкоди, алгоритмічно спрямував винищувачі на найближчі виявлені цілі, включно з низьковисотними та низькошвидкісними ударними БпЛА противника. Існуючий алгоритм виділяє лише одну дію за цикл. Це закономірно призвело до швидкого та нераціонального вичерпання високовартісного боєкомплекту ракетного озброєння. В свою чергу під час моделювання при застосуванні методу гілок і меж (рис.2) дозволяє оптимізатору в першу чергу застосовувати дешеві засоби та відсікати використання винищувачів по масових цілях до знищення першочергових цілей [8].

На рис.2а показано розподіл наявних засобів по цілях (де спочатку застосували дешеві засоби по БпЛА противника, а винищувачі – лише КР), де здійснено оптимальний розподіл та показано залишок АЗУ що вдалося заощадити.

На рис.2б показано розподіл наявних засобів по цілях (де кількість цілей більша за наявних засобів) оптимальний розподіл забезпечив максимальну кількість знищених засобів для виконання визначеного завдання ППО. Застосування винищувачів по дешевих цілях типу БпЛА відбулося лише після закінчення БК дешевих засобів, з метою виконання отриманого завдання.

Натомість удосконалена методика в межах одного робочого циклу відразу призначає до першої пріоритетної групи вертольоти та БпЛА-перехоплювачі, що працюватиме по низьковисотних та низькошвидкісних цілях, доки сумарна ймовірність не задовольнить вимогу, або замінює засіб що не спроможний гарантовано забезпечити необхідну надійність оборони на рівні $P_\Sigma \geq 0{,}85$. Відповідно винищувачі були алгоритмічно відсічені від виконання завдань по низьковисотних та низькошвидкісних цілях і безальтернативно розподілені виключно на перехоплення КР. Винищувачі потрапляють до першої групи виключно після атаки крилатих ракет. Завдяки такому раціональному делегуванню завдань, загальні фінансові витрати на дорого вартісний боєкомплект скоротилися майже в 2 рази порівняно з класичним підходом. Крім того, додано підпрограму динамічного просторового балансування, яка на етапі призначення дії розмежовує зони роботи засобів завдяки розрахунку оптимальних просторових областей $\Delta R_{\text{опт}}$, що звело ризик виникнення “дружнього вогню” до мінімуму [10].

МАТРИЦЯ РОЗПОДІЛУ ЗАСОБІВ

ID цілі	Тип (КР або Дрон)		
1	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
2	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
3	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
4	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
5	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
6	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
7	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
8	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
9	КР	0,9	F-16 (1 шт);
10	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
11	КР	0,9	F-16 (1 шт);
12	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
13	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
14	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
15	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
16	КР	0,9	F-16 (1 шт);
17	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
18	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
19	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
20	КР	0,9	F-16 (1 шт);
21	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
22	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
23	КР	0,9	F-16 (1 шт);
24	БпЛА	0,9	F-16 (1 шт);

НАЗВА ЗАСОБУ	ВИТРАЧЕНО	ЗАЛИШОК
F-16	6	10
Mergps	20	0
Mi-8	16	0

а – при достатній кількості засобів;

МАТРИЦЯ РОЗПОДІЛУ ЗАСОБІВ

ID цілі	Тип (КР або Дрон)		
1	КР	0,9	F-16 (1 шт);
2	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
3	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
4	КР	0,9	F-16 (1 шт);
5	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
6	КР	0,9	F-16 (1 шт);
7	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
8	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
9	КР	0,9	F-16 (1 шт);
10	БпЛА	0,96	Mergps (1 шт); Mergps (1 шт);
11	КР	0,9	F-16 (1 шт);
12	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
13	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
14	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
15	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
16	КР	0,9	F-16 (1 шт);
17	БпЛА	0,9	F-16 (1 шт);
18	БпЛА	0,9	F-16 (1 шт);
19	БпЛА	0,9	F-16 (1 шт);
20	КР	0,9	F-16 (1 шт);
21	БпЛА	0,9	F-16 (1 шт);
22	БпЛА	0,9	F-16 (1 шт);
23	КР	0	Недостатньо засобів (БК вичерпано)
24	БпЛА	0	Недостатньо засобів (БК вичерпано)

НАЗВА ЗАСОБУ	ВИТРАЧЕНО	ЗАЛИШОК
F-16	12	0
Mergps	12	0
Mi-8	8	0

б – при недостатній кількості засобів;

Рисунок 2 – Результат обчислювального експерименту, який моделював відбиття засобами пілотованої та безпілотної авіації змішаного масованого нальоту ЗПН противника.

Обговорення

Традиційні базові алгоритми цілерозподілу демонструють задовільні результати здебільшого в умовах управління однорідними засобами ППО. Однак, як засвідчив аналіз, при існуючому застосуванні пілотованої та безпілотної авіації такий підхід виявляється тактично та економічно невигідним. Отриманий у ході дослідження науковий результат переконливо доводить, що інтеграція методу гілок і меж для призначення засобів пілотованої та безпілотної авіації дозволяє системі миттєво створювати необхідну щільність вогню за рахунок залучення всіх наявних засобів за побудованими ешелонами [5,13]. Важливою перевагою цього методу є те, що він ефективно розв'язує математичну проблему вибору між нереалістичними частковими (дробовими) варіантами застосування авіації, генеруючи чіткий та однозначний цілочисельний план розподілу пілотованої та безпілотної авіації відповідно до ступеня загрози ЗПН.

Разом з тим, необхідно відзначити певні обмеження розробленої моделі, які насамперед пов'язані з детермінованістю вхідних даних. У реальній бойовій обстановці базові ймовірності ураження повітряних цілей можуть динамічно та непередбачувано знижуватися під інтенсивним впливом ворожих засобів радіоелектронної боротьби. За таких умов конфліктної невизначеності доцільним вбачається перехід до інструментарію теорії матричних ігор. Застосування змішаних або мінімаксних стратегій дозволить системі гарантувати прийнятний результат цілерозподілу навіть у найгірших умовах активної протидії противника, що може стати предметом наступних наукових досліджень.

Висновки

У статті удосконалено методику розподілу повітряних цілей між пілотованою та безпілотною авіацією під час виконання завдань з авіаційного прикриття. Удосконалена методика, на відміну від існуючих, що орієнтовані переважно на максимізацію завданої шкоди, використовує метод гілок і меж та враховує показник економічної вартості C_j кожного засобу при перехопленні та базується на зміні підходів до цілерозподілу в бік мінімізації сумарних витрат критично важливих ресурсів за умови досягнення заданої ймовірності ураження. Проведене моделювання процесу цілерозподілу в умовах масованого змішаного нальоту переконливо доводить перевагу удосконаленого алгоритму над прямолінійною стратегією застосування винищувачів. Головним здобутком нової методики є підвищення економічної ефективності застосування засобів протиповітряної оборони. Це досягається завдяки суворому ранжуванню ресурсів за критерієм мінімальної вартості, що унеможливлює нераціональне витрачання дорогих авіаційних чи зенітних ракет на дешеві безпілотники. Дослідження показали здатність системи генерувати раціональний цілочисельний план бою: алгоритм автоматично призначає на масові загрози типу БпЛА відносно дешеві засоби пілотованої (вертольоти) та безпілотної (БпЛА-перехоплювачі) авіації і лише потім більш дорожчі засоби при цьому гарантовано зберігаючи озброєння винищувачів для перехоплення складніших цілей, таких як КР. І тільки після вичерпання всіх дешевих засобів, відбувається призначення дорогих (винищувачів) можуть бути розподілені на дешеві цілі. Крім того, інтеграція обмежень на просторово-часові характеристики унеможливлює виникнення “дружнього вогню”. Таким чином, удосконалена методика послідовного нарощування зусиль максимізує ймовірність збереження об'єктів прикриття при експоненційному зменшенні вартості бою, що робить її оптимальною для

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license(http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

впровадження в сучасні автоматизовані системи управління військами. У підсумку, практичне впровадження розробленої методики дозволяє уникнути виснаження ресурсів системи ППО та скорочує витрати високовартісного БК авіації майже вдвічі.

Удосконалена методика розподілу повітряних цілей між пілотованою та безпілотною авіацією під час виконання завдань з авіаційного прикриття буде корисною для органів військового управління при плануванні та проведенні розрахунків необхідних засобів.

Список використаних джерел

[1.] О. Титаренко та Є. Власенко, "Протиповітряна оборона в російсько-українській війні: уроки та рекомендації," Повітряна міць України, т. 1, № 6, с. 49–55, 2024, https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-49-55.

[2.] О. Головченко, "Тенденції ведення збройної боротьби армією Російської Федерації – дослідження через призму контент-аналізу," Грааль науки, № 7, с. 122–124, 2021, https://doi.org/10.36074/grail-of-science.27.08.2021.020.

[3.] Б. Ж. Шкурат, "Методика динамічного розподілу ресурсів у спільних діях наземних і повітряних засобів протиповітряної оборони," Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони, № 2(47), с. 147–154, 2023, https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-47-2-147-154.

[4.] І. І. Шовкошитний та О. А. Василенко, "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," Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони, вип. 3(54), с. 15–24, 2025, https://doi.org/10.33099/2311-7249/2025-54-3-15-24.

[5.] В. І. Грабчак, В. М. Супрун та Ю. С. Бистрик, "Математична модель оптимального розподілу засобів ураження," Військово-технічний збірник, вип. 1(10), с. 16–23, 2014.

[6.] С. М. Телюков, С. В. Гузченко, І. А. Таран та Г. А. Зливка, "Методика визначення оптимального розподілу протитанкових засобів для знищення броньованих цілей противника при плануванні вогневих засідок в оборонному бою," Системи озброєння і військова техніка, вип. 3(55), с. 44–50, 2018.

[7.] Г. А. Шелудько, В. В. Науменко та О. О. Стрельнікова, Методи розв'язання задач оптимізації: Конспект лекцій. Харків, Україна: УкрДАЗТ, 2014.

[8.] М. А. Гринченко та М. О. Чернишова, "Технологія розподілу ресурсів у проекті між виконавцями," Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, вип. 58, с. 155–166, 2013.

[9.] В. Д. Романенко, Теорія ігор: Навчальний посібник. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.

[10.] П. В. Северілов та К. І. Гула, "Моделі оптимального розподілу ресурсів у вертикально інтегрованій системі," Вісник Вінницького політехнічного інституту, вип. 6, с. 41–46, 2008.

[11.] О. Є. Басманов, Д. І. Савельєв, Р. С. Мележик та Т. О. Луценко, "Алгоритм оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами," Проблеми надзвичайних ситуацій, вип. 2(38), с. 181–193, 2023.

[12.] NATO, AJP-3.3: Allied Joint Doctrine for Air and Space Operations. Brussels, Belgium: NATO Standardization Office.

[13.] Я. Б. Сікора, А. Й. Щехорський та Б. Л. Якимчук, Методи оптимізації та дослідження операцій. Житомир, Україна: Вид-во ЖДУ ім. Івана Франка, 2019.

[14.] Г. П. Донець та Л. М. Колєчкіна, Екстремальні задачі на комбінаторних конфігураціях: монографія. Полтава, Україна: РВВ ПУЕТ, 2011.

[15.] Генеральний штаб Збройних Сил України, Тимчасова штабна методика оцінювання ефективності протиповітряної оборони України, затв. наказом ГШ ЗСУ від 27.06.2019 № 232/дск. Київ, Україна: ГШ ЗСУ, 2019.

Oleh Pechenenko
https://orcid.org/0009-0008-9925-3089

National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ENHANCED METHODOLOGY FOR DISTRIBUTION OF AIR TARGETS BETWEEN MANNED AND UNMANNED AVIATION DURING AIR COVER MISSIONS

In the context of modern armed conflicts, the mass use by the enemy of various types of air attack means requires conceptually new approaches to organizing the aviation cover subsystem in the air defense system, and especially a revision of existing target distribution algorithms. Traditional means (fighters, ground-based air defense systems) according to the experience of the Russian-Ukrainian war are critically overloaded, which necessitates the joint use of manned and unmanned aviation. There is an urgent need to change approaches to countering the enemy's air attack means: from the classic task of maximizing damage to the task of minimizing the interception cost while meeting the requirements of the raid repulsion criterion. The purpose of the study is to improve the methodology for distributing air targets, which will allow taking into account the effectiveness of using unmanned aerial vehicles and helicopters during target distribution. The mathematical apparatus used in the article is based on integer dynamic methods. The paper describes a step-by-step target allocation algorithm using the branch and bound method, which guarantees finding the global optimum for integer problems and also takes into account spatial-temporal constraints. The study proved that for mass strikes by inexpensive unmanned aerial vehicles, the algorithm automatically assigns unmanned aerial vehicles – interceptors and helicopters, preserving the resources of fighters and aviation strike assets for intercepting cruise missiles.

Keywords: *russian-ukrainian war; air defense; air attack means; air cover; unmanned aerial vehicles; UAV-interceptor; planning; target allocation; efficiency; combat operations.*

References

[1.] O. Tytarenko and Ye. Vlasenko, "Air defense in the Russian-Ukrainian war: Lessons and recommendations," Air Power of Ukraine, vol. 1, no. 6, pp. 49–55, 2024, *https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-49-55*. (in Ukrainian)

[2.] O. Holovchenko, "Trends in the conduct of armed struggle by the army of the Russian Federation - a study through the prism of content analysis," Grail of Science, no. 7, pp. 122–124, 2021, *https://doi.org/10.36074/grail-of-science.27.08.2021.020*. (in Ukrainian)

[3.] B. Zh. Shkurat, "Methodology of dynamic resource allocation in joint actions of ground and air defense assets," Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence, no. 2(47), pp. 147–154, 2023, *https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-47-2-147-154*. (in Ukrainian)

[4.] I. I. Shovkoshytnyi and O. A. Vasylenko, "Target allocation management of a swarm of heterogeneous strike unmanned aerial vehicles for engaging non-stationary group targets based on an adaptive algorithm using optimization methods and artificial intelligence elements," Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence, no. 3(54), pp. 15–24, 2025, *https://doi.org/10.33099/2311-7249/2025-54-3-15-24*. (in Ukrainian)

[5.] V. I. Hrabchak, V. M. Suprun, and Yu. S. Bystryk, "Mathematical model of optimal allocation of engagement means," Military Technical Collection, no. 1(10), pp. 16–23, 2014. (in Ukrainian)

[6.] S. M. Teliukov, S. V. Huzchenko, I. A. Taran, and H. A. Zlyvka, "Methodology for determining the optimal allocation of anti-tank weapons for destroying enemy armored targets when planning fire ambushes in defensive combat," Systems of Arms and Military Equipment, no. 3(55), pp. 44–50, 2018. (in Ukrainian)

[7.] H. A. Sheludko, V. V. Naumenko, and O. O. Strelnikova, Methods for Solving Optimization Problems: Lecture Notes. Kharkiv, Ukraine: UkrDAZT, 2014. (in Ukrainian)

[8.] M. A. Hrynchenko and M. O. Chernyshova, "Technology of resource allocation in a project between performers," Open Information and Computer Integrated Technologies, no. 58, pp. 155–166, 2013. (in Ukrainian)

[9.] V. D. Romanenko, Game Theory: Study Guide. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2022. (in Ukrainian)

[10.] P. V. Severilov and K. I. Hula, "Models of optimal resource allocation in a vertically integrated system," Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute, no. 6, pp. 41–46, 2008. (in Ukrainian)

[11.] O. Ye. Basmanov, D. I. Saveliev, R. S. Melezhyk, and T. O. Lutsenko, "Algorithm for optimal allocation of equipment among fire departments," Problems of Emergencies, no. 2(38), pp. 181–193, 2023. (in Ukrainian)

[12.] NATO, AJP-3.3: Allied Joint Doctrine for Air and Space Operations. Brussels, Belgium: NATO Standardization Office, 2016.

[13.] Ya. B. Sikora, A. Y. Shchekhorskyi, and B. L. Yakymchuk, Methods of Optimization and Operations Research. Zhytomyr, Ukraine: Zhytomyr Ivan Franko State University Press, 2019. (in Ukrainian)

[14.] H. P. Donets and L. M. Koliechkina, Extremal Problems on Combinatorial Configurations: Monograph. Poltava, Ukraine: PUET, 2011. (in Ukrainian)

[15.] General Staff of the Armed Forces of Ukraine, Temporary Staff Methodology for Evaluating the Effectiveness of Ukraine's Air Defense, approved by Order of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine No. 232/dsk dated June 27, 2019. Kyiv, Ukraine: General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2019. (in Ukrainian)

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license(http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)