

ПИТАННЯ БОЙОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИН ТА ПІДРОЗДІЛІВ ДЕРЖАВНОЇ АВІАЦІЇ УКРАЇНИ, ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ, РАДІОТЕХНІЧНИХ ТА СПЕЦІАЛЬНИХ ВІЙСЬК, ЗВ'ЯЗКУ, РАДІОТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-20-25

УДК 358.4

Ткаченко Анатолій Володимирович
<https://orcid.org/000-0001-7316-5437>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

СТРАТЕГІЇ ВИБОРУ МАРШРУТУ ПОЛЬОТУ АВІАЦІЇ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПЛАНУВАННЯ ПОДОЛАННЯ ППО ПРОТИВНИКА НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ КЛІТИННОГО АВТОМАТА

В статті представлено стратегії вибору маршруту польоту авіації для нанесення авіаційного удару в умовах протидії засобів протиповітряної оборони противника. Проводиться порівняльний аналіз ефективності трьох метаевристичних алгоритмів клітинних автоматів, мурашиного алгоритму та генетичного для генерації альтернативних маршрутів. Удосконалено метод вибору оптимальної стратегії польоту з числа альтернативних маршрутів шляхом ранжування маршрутів відносно трьох стратегій: мінімальної відстані, мінімального часу та мінімізації втрат повітряних суден. Застосування методу клітинного автомата дозволяє розрахувати всі значущі фактори оперативної обстановки, тобто клітин з “итрафним” коефіцієнтом, які відповідають відповідному рівню загроз повітряному судну. Результатом є вибір оптимального маршруту польоту авіації.

Ключові слова: маршрут польоту, планування польоту, авіаційний удар, клітинний автомат, подолання протиповітряної оборони противника.

Вступ

Оптимізація маршрутів польоту авіації (тактичних груп, підрозділів) включаючи як пілотовані так і безпілотні літальні апарати (БпЛА), має першочергове значення для ефективності бойових завдань. Нанесення зосереджених (групових) авіаційних ударів на території противника в операції (бойових діях) вимагають планування маршрутів польоту з подоланням системи протиповітряної оборони противника. Розв'язання цієї задачі полягає обґрунтуванні (розрахунку та вибору) найбільш оптимального маршруту подолання ППО противника, при якому протидія наземних ЗРК буде мінімальною. Критерієм оптимальності є мінімальна кількість успішних пусків (вражаючих пострілів) з боку засобів ППО противника.

Метою статті є обґрунтування стратегії вибору маршруту польоту авіації при моделюванні планування нанесення авіаційного удару в ході подолання засобів протиповітряної оборони противника.

Матеріали та методи

Наявні публікації підтверджують важливість порівняльного аналізу евристичних та метаевристичних методів для швидкого вирішення задачі пошуку маршруту в складних умовах оперативної обстановки, причому найбільший інтерес становлять саме метаевристичні (біо-

алгоритми) підходи. Досвід засвідчує, що дослідження активно ведуться у сфері оптимізації маршрутів як пілотованих так і безпілотних літальних апаратів. Зокрема, серед останніх робіт, цитованих у статті (2022–2025 рр.) [1, 2] розглядаються питання планування оптимальних маршрутів БпЛА, вдосконалення алгоритмів для задачі комівояжера (Traveling Salesman Problem, TSP) з використанням мурашиної оптимізації [3] та визначення найкоротшого шляху для військових операцій [4, 5].

Таким чином, актуальність статті підтримується постійним пошуком більш адаптивних та швидких рішень для безпечного подолання протидії противника, які пропонує метод клітинного автомата.

Порівняльний аналіз метаевристичних алгоритмів для генерації маршрутів польоту авіації. Ефективність евристичних та мета евристичні методів для вирішення задачі пошуку маршруту польоту авіації на нанесення авіаційного удару на території противника вимагають швидких рішень у складних умовах оперативної обстановки. Найбільший інтерес представляють саме метаевристичні (біо-алгоритми) підходи.

Клітинні автомати (КА) дозволяють моделювати повітряний простір як тривимірну сітку (“решітчастий газ”), де кожна клітина має властивості, що відповідають загрозам (зони

ураження ЗРК, зони виявлення РТВ, рельєф місцевості, погодні умови, тощо). Маршрут будується шляхом вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації з умовами максимальної ймовірності успішного прольоту та мінімального відхилення від цілі.

Мурашиний алгоритм використовує імітацію поведінки мурах, що залишають феромонні сліди для пошуку найкоротших шляхів. В контексті авіаційного удару, “феромони” можуть позначати не тільки короткі, але й безпечні ділянки.

Генетичний алгоритм імітує еволюційні процеси (схрещування, мутація, відбір) для пошуку оптимальних рішень. Популяція “індивідів” (маршрутів) еволюціонує, відбираючи найкращі варіанти на основі “функції пристосованості”, яка може враховувати безпеку, час та витрати палива.

На відміну від більш абстрактних методів, таких як генетичні алгоритми або мурашині алгоритми, клітинні автомати забезпечують найбільш природне та інтуїтивне представлення бойового простору – моделювання повітряного простору як тривимірної сітки (“решітчастого газу”) дозволяє з високою точністю та гранулярністю враховувати гетерогенність середовища. Кожна клітина може містити вичерпну інформацію про загрози:

стаціонарні загрози: радіус дії та ймовірність ураження силами ППО противника;

динамічні загрози: положення рухомих засобів ППО противника.

природні перешкоди: рельєф місцевості, зони складних метеорологічних умов.

Такий підхід дозволяє легко інтегрувати дані з різних джерел розвідки, просто “накладаючи” їх на відповідні клітини сітки.

Для значення поведінкових властивостей КА з урахуванням

Завдання для визначення варіанту маршруту польоту повітряного судна зводиться до задачі пошуку найкоротшого шляху в тривимірному просторі із заданими властивостями, тобто пошуку найкоротшого шляху між двома вершинами, в якому мінімізується сума штрафу від відвідування областей з різними властивостями. При плануванні авіаційного удару по наземних цілях визначають кількість груп тактичного призначення, авіаційні засоби ураження і стратегії вибору маршруту польоту для кожних груп підрозділів бойового порядку авіації. Саме стратегії вибору маршруту польоту обираються за досвідом та знанням оперативної обстановки. Тому для груп тактичного призначення необхідно визначати свою стратегію пошуку альтернативних маршрутів.

Використання клітинного автомата реалізує окремий випадок методу випадкового пошуку, однак на відміну від існуючих методів проводиться імітація цілеспрямованого пошуку з випадковим механізмом зміни станів. Ця концепція дозволяє моделювати складну, глобальну поведінку, що виникає з локальних взаємодій, що робить її придатною для вирішення оптимізаційних задач,

таких як пошук найкоротшого або найбезпечнішого шляху в динамічному середовищі.

Еволюція станів цих клітин за локальними правилами визначає оптимальний маршрут.

Результати

За аналізом результатів бойових дій за досвідом російсько-української війни доцільно визначити стратегії вибору маршруту польоту, розрахованих на основі цього підходу:

1. Стратегія мінімізації відстані.

Це основна стратегія, що використовує фундаментальні властивості КА для пошуку найкоротшого шляху в дискретному просторі. Сутність полягає в пошуку маршруту з найменшою кількістю клітин (кроків) між точкою старту та призначенням (удару), оминаючи статичні та динамічні перешкоди. При цьому, повітряний простір моделюється як сітка. Клітинам присвоюються стани: “старт”, “фініш”, “перешкода”, “вільний простір”. На кожному такті часу (clock cycle) клітини, що є сусідніми до вже позначених як “досяжні”, також стають “досяжними”, якщо вони є вільними. Цей процес імітує поширення хвилі від точки старту. Еволюція триває, доки хвиля не досягне точки призначення (удару). Найкоротший шлях відновлюється рухом у зворотному напрямку, від фінішу до старту, по клітинах, які послідовно ставали “досяжними” на кожному попередньому кроці.

2. Стратегія уникнення динамічних перешкод (адаптивна модель).

Ця стратегія фокусується на безпеці, враховуючи, що повітряний простір є динамічним середовищем. Вона спрямована на зменшення часу знаходження в клітинах з динамічною перешкодою. Сутність цієї стратегії в прокладенні маршруту, який активно уникає зон з несприятливими або небезпечними умовами, що змінюються в часі. Такими зонами можуть бути зони виявлення РТВ, зони ураження ЗРВ, зони введення в бій винищувальної авіації противника, тощо. Клітини можуть мати стани, що відповідають динамічним перешкодам. Ці стани оновлюються на кожному кроці симуляції на основі зовнішніх даних. Правила переходу забороняють поширення “хвилі маршруту” через клітини, що мають стан динамічної перешкоди. Модель польоту ПС симулюючи модель поведінки “боязку” на кілька кроків уперед і прокладаючи маршрут, який залишатиметься безпечним протягом усього польоту.

3. Стратегія оптимізації за вартістю (ймовірнісний або неперервний КА).

Ця стратегія узагальнює поняття “кращий” маршрут, включаючи не лише відстань, а й інші фактори, такі як витрата палива, час польоту або рівень ризику. Знайти маршрут з найменшою сукупною “вартістю”, де кожна клітина має певну ціну прольоту через неї. Стан клітини може бути не просто дискретним маркером, а неперервним значенням, що представляє вартість (наприклад, очікувані витрати палива в цій зоні). Правила

переходу можуть бути ймовірнісними, де перехід у сусідню клітину залежить від її вартості. Наприклад, використовувати ймовірнісний КА, де вибір сусіда визначається ймовірністю, яка обернено пропорційна вартості прольоту. Замість поширення простого маркера “досяжності”, КА поширює сукупну вартість шляху від старту. Маршрут відновлюється за градієнтом найменшої вартості.

4. Стратегія формування стійких коридорів (використання атракторів)

Ця стратегія спрямована не на пошук одного оптимального маршруту, а на визначення стабільних і безпечних “коридорів” для регулярних польотів. Суть стратегії у виявленні у просторово-часовій еволюції системи стабільні структури (атрактори), які представляють собою безпечні шляхи, стійкі до незначних збурень. КА запускається на велику кількість ітерацій з різними початковими умовами (наприклад, випадковим шумом, що імітує дрібні погодні збурення). Аналізується діаграма переходів станів системи. Цикли на цьому графіку відповідають періодичним, стабільним конфігураціям (атракторам). Ті послідовності клітин, які залишаються вільними у багатьох стабільних конфігураціях, формують надійні польотні коридори. Ця стратегія використовує здатність КА до самоорганізації та формування стійких патернів з простих правил, що дозволяє виявляти емерджентні властивості системи, такі як безпечні маршрути.

Алгоритм методу розв'язання завдання процесу вибору маршруту польоту авіації для нанесення авіаційного удару відповідно вибраній стратегії зображено на рис 1.

Алгоритм базується на моделі КА, де повітряний простір дискретизується у вигляді сітки (2D або 3D). Кожна клітина (комірка) сітки $S(i, j, k)$ має набір станів, що еволюціонують у часі за певними локальними правилами з метою пошуку оптимальної послідовності клітин від точки S (старт) до точки F (фініш), що відповідає одній із обраних стратегій.

На реалізацію стратегії можуть впливати глибина аналізу простору руху, принцип визначення штрафних функцій, принцип реалізації механізмів випадкового вибору напрямку руху і принцип формування правил переходу. При цьому, використання КА дозволяє реалізовувати одночасний пошук маршрутів для різних стратегій пошук або одночасний пошук маршрутів для кожної стратегії пошуку із урахуванням вже прокладених маршрутів.

Для кожного типу ПС (ведучого групи тактичного призначення):

1. Визначається злітна маса ПС відповідно варіанту бойового навантаження та заправки паливом.

2. Розбивається простір пошуку на елементи осередків клітинного автомату.

3. Визначається у відповідність кожному елементу характеристику простору і вигляді штрафу

за проліт через елементи простору призначеного ризику для польоту.

4. Представляємо політ ПС як послідовне відвідування осередків КА з різними властивостями відповідно до обраної стратегії.

5. Знаходимо маршрут польоту ПС, шлях з точки старту до точки нанесення авіаційного удару по наземній цілі та до точки фінішу (посадки).

На практиці необхідно розрахувати кілька варіантів для кожної з груп тактичного призначення. Можливим підходом для розрахунку альтернативного маршруту польоту ПС буде подвоєння штрафних елементів, через які проходить раніше розрахований маршрут.

Обговорення

Отже, метод КА дозволяє моделювати повітряний простір як тривимірну сітку, де кожна клітина може містити вичерпну інформацію про загрози, включаючи стаціонарні та динамічні загрози, а також природні перешкоди. Запропоновані чотири основні стратегії вибору маршруту польоту авіації при моделюванні планування подолання ППО противника. Обмеженість врахування всіх факторів обстановки, обмеженість ресурсів в ході прийняття рішення на авіаційний удар має бути не суто теоретичним, а спрямованим на конкретні управлінські рішення. Нижче наведено основні напрямки їх впровадження.

1. Забезпечення оперативної інтеграції даних розвідки про динамічні загрози в реальному часі в модель КА.

Стратегія уникнення динамічних перешкод вимагає, щоб стани клітин, що відповідають динамічним загрозам (положення рухомих засобів ППО), оновлювалися на кожному кроці симуляції на основі даних розвідки з декількох джерел. Важливо визначити, які механізми (протоколи, апаратне забезпечення) необхідні для високошвидкісної інтеграції розвідувальних даних, щоб модель КА могла підтримувати адаптивну поведінку “боязку” та забезпечувати безпечний проліт пілотованих та безпілотних літальних апаратів у швидкозмінному бойовому середовищі.

2. Удосконалення функції “штрафу” та критерії ранжування маршрутів для точного відображення багатокритеріальної оптимізації в умовах багатоешелонованої ППО.

Завдання пошуку маршруту зводиться до багатокритеріальної задачі оптимізації, де мінімізується сума “штрафу” від відвідування небезпечних областей. Критерієм оптимальності є мінімальна кількість успішних пусків з боку засобів ППО. Необхідно визначити методику точного визначення штрафного коефіцієнта для елементів простору призначеного ризику, а також, як у рамках стратегії оптимізації за вартістю ефективно зважувати такі фактори, як ризик ураження, час польоту та витрата палива, щоб точно ранжувати альтернативні маршрути, отримані шляхом незначної зміни вагових коефіцієнтів.

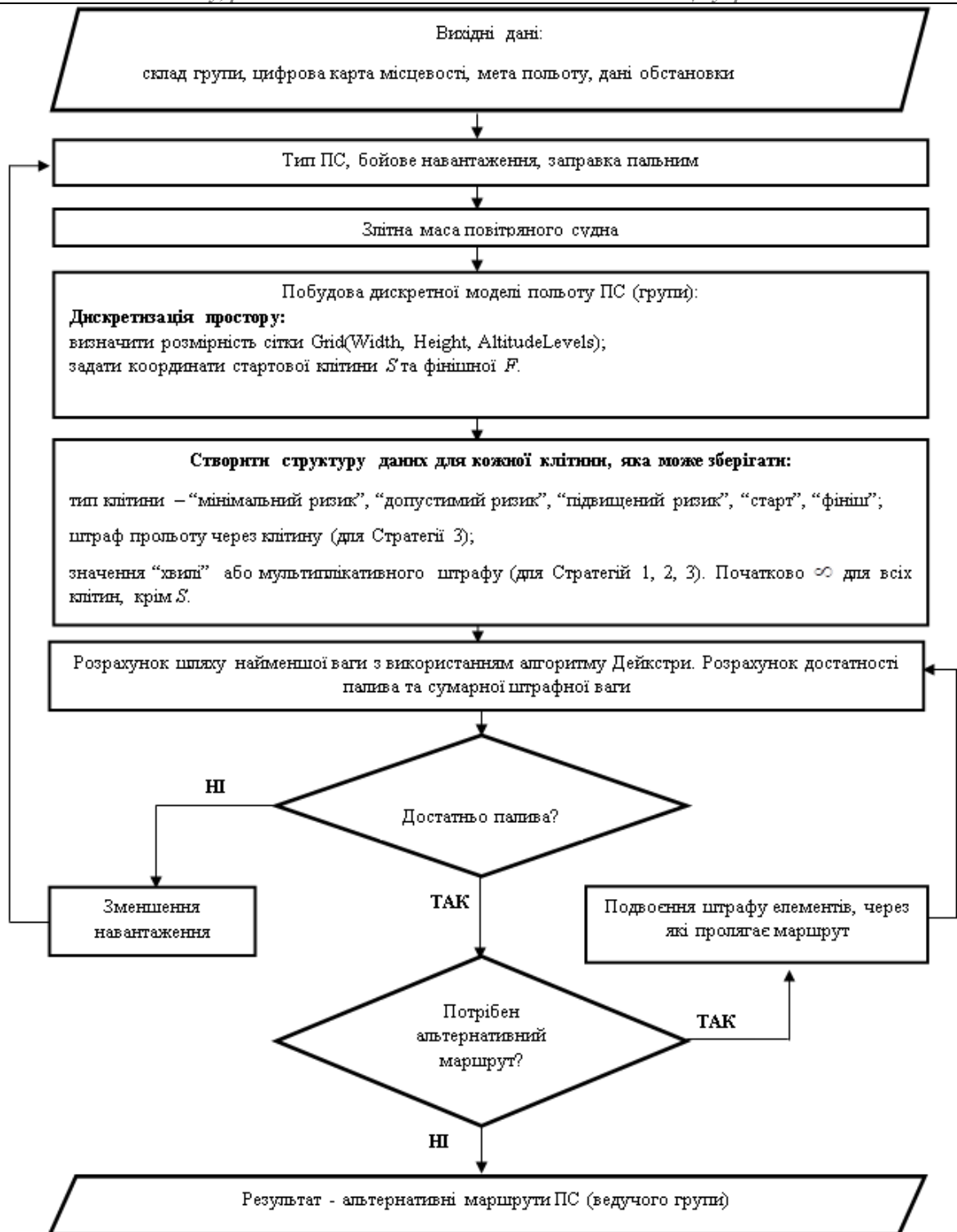


Рисунок 1 – Структура методу визначення вибору маршруту польоту авіації на нанесення авіаційного удару відповідно вибраній стратегії

3. Технічні засоби та архітектурні рішення для паралельної реалізації всіх чотирьох стратегій КА з метою швидкого розрахунку сімейства альтернативних маршрутів для груп тактичного призначення.

Використання КА забезпечує високу швидкість розрахунку за рахунок паралелізму. Необхідність розрахунку кількох варіантів для кожної з груп тактичного призначення, а також можливість

одночасного пошуку маршрутів для різних стратегій. Необхідне впровадження обчислювальні архітектури та програмних інструментів (Wolfram Mathematica та MS Excel в останніх дослідженнях) для швидкої та паралельної генерації сімейства альтернативних маршрутів відповідно до всіх чотирьох стратегій [8–11].

4. Інтегрувати стратегію формування стійких коридорів (атракторів) у планування, враховуючи необхідність швидкої адаптації до змін загроз.

Стратегія формування стійких коридорів спрямована на виявлення стабільних і безпечних шляхів, стійких до незначних збурень. Чи можливо практично використовувати стабільні структури (атрактори) для тактичної авіації, коли бойове середовище є високо динамічним та слугувати основою для прокладання шляхів, які потім коригуються в реальному часі за допомогою адаптивної стратегії (уникнення динамічних перешкод), і як часто має проводитися аналіз діаграми переходів станів для оновлення цих коридорів?

Висновки

У статті розроблено, проаналізовано та обґрунтовано чотири стратегії, які базуються на моделі КА для вибору оптимального маршруту польоту кожній групі бойового порядку авіації при плануванні подолання засобів протиповітряної оборони противника. Клітинні автомати підтверджують найкращий баланс між реалістичністю моделювання бойового простору, високою швидкістю розрахунку завдяки паралелізму, винятковою адаптивністю до загроз та гнучкістю у реалізації, порівняно з мурашиним та генетичним алгоритмами. На відміну від методів, які збігаються до одного-єдиного оптимального рішення, застосування клітинного автомата дозволяє генерувати сімейство альтернативних маршрутів для подальшого аналізу, вибору що досягається шляхом зміни вагових коефіцієнтів у функції “штрафу”.

Результати цієї статті мають практичне значення і можуть бути корисними для фахівців з планування авіаційних ударів тактичних груп, підрозділів на території противника, включаючи як пілотовані, так і безпілотні літальні апарати.

Список використаних джерел

1. Полуйко О.М., Онищенко П.М., Тимошенко О.В., Корецький В.Я. Методика оптимізації маршруту подолання ППО противника підрозділами тактичної авіації. Системи озброєння і військова техніка, випуск 4 (56), 2018. – С. 48–51. DOI: 10.30748/soivt.2018.56.07. Режим доступу: <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.56.07>.
2. Семенюта М.Ф., Якименко С.М., Осадчий С.І. Оптиміальне планування маршрутів безпілотних літальних апаратів для ефективного покриття заданої території. Центральнотериторіальний науковий вісник. Технічні науки, випуск 12 (43, ч. І), 2025. – С. 31–43. Режим доступу: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.31-43](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.31-43).
3. Vorotnikov V., Gumenyuk I., Pozdniakov P. Planning the flight routes of the unmanned aerial vehicle by solving the travelling salesman problem. Technology Audit and Production Reserves. 4/2(36), 2023, 44–49. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.108537. Режим доступу: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.108537>.
4. Удодова О., Вовчук С. Оптимізація найкоротшого маршруту для військових операцій за допомогою MS

Excel та Wolfram Mathematica. Фізико-математична освіта, випуск 2(40), 2025. – С. 57–62. DOI: 10.31110/fmo2025.v40i2-08. Режим доступу: <https://doi.org/10.31110/fmo2025.v40i2-08>.

5. Hulianytskyi L.F., Rybalchenko O. V. Route optimization in planning missions of hybrid transport systems “drone + vehicle”. Kibernetika ta kompiuterni tekhnologii, (3) 2023, 44–58. DOI: 10.34229/2707-451X.23.3.4. Режим доступу: <https://doi.org/10.34229/2707-451X.23.3.4>.

6. Воробйов С.С., Павленко М.А., Хлебніков С. Ю., Гладішев М. Г. Використання кліткового автомату у методі вибору варіанту маршруту польоту ударних літаків щодо ураження наземних цілей. Системи озброєння і військова техніка, випуск 1 (53), 2018. – С. 84–90. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2018_1_14.

7. Никифоров О.В., Смик С. І., Мартиненко П. М., Ситник Ю.Б., Могилащенко А.С. Розрахунок тактичного радіуса дії літаків з турбореактивною силовою установкою при скороченому наборі вихідних даних. Системи озброєння і військова техніка, випуск 4 (68), 2021. – С. 40–48. DOI: 10.30748/soivt.2021.68.06. Режим доступу: <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.68.06>.

8. Удодова О., Вовчук С. Оптимізація найкоротшого маршруту для військових операцій за допомогою MS Excel та Wolfram Mathematica. Фізико-математична освіта, випуск 2(40), 2025. – С. 57–62. DOI: 10.31110/fmo2025.v40i2-08. Режим доступу: <https://doi.org/10.31110/fmo2025.v40i2-08>.

9. Hulianytskyi L.F., Rybalchenko O. V. Route optimization in planning missions of hybrid transport systems “drone + vehicle”. Kibernetika ta kompiuterni tekhnologii, (3) 2023, 44–58. DOI: 10.34229/2707-451X.23.3.4. Режим доступу: <https://doi.org/10.34229/2707-451X.23.3.4>.

10. Costley A., Christensen R. C., Leishman R., Droge G. N. Analytical aircraft state and imu signal generator from smoothed reference trajectory / IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems/ 58(3), 2022, 2517–2530. DOI: 10.1109/TAES.2021.3090740. Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3090740>.

11. Murugananthan V., Rehan M. Y. E. S., Srinivasan R., Kavitha M., Kavitha R. Traveling Salesman Problem with Ant Colony Optimization. In 2-nd International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA). DOI: 10.1109/ICECAA58104.2023.10212262. Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/ICECAA58104.2023.10212262>.

12. Uddin F., Riaz N., Manan A., Mahmood I., Song O.-Y., Malik A. J., Abbasi A. A. An Improvement to the 2-Opt Heuristic Algorithm for Approximation of Optimal TSP Tour. Applied Sciences, 13(12), 2023. DOI: 10.3390/app13127339. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/app13127339>.

13. Бабич В., Костенко А., Плеша В., Плеша М., Хмілярчук Л. Задача пошуку найкоротшого шляху: порівняльний аналіз основних алгоритмів. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, (2), 2023, 99–106. DOI: 10.32782/IT/2023-2-12. Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-2-12>.

14. Vorotnikov V., Gumenyuk I., Pozdniakov P. Planning the flight routes of the unmanned aerial vehicle by solving the travelling salesman problem. Technology Audit and Production Reserves. 4/2(36), 2023, 44–49. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.108537. Режим доступу: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.108537>.

Anatolii Tkachenko

<https://orcid.org/000-0001-7316-5437>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

A STRATEGY FOR SELECTING AVIATION FLIGHT ROUTES FOR OVERCOMING ENEMY AIR DEFENSES BASED ON CELLULAR AUTOMATON MODELING

The article presents strategies for selecting aviation flight routes for conducting an air strike under conditions of counteraction by enemy air defense assets. A comparative analysis of the effectiveness of three metaheuristic algorithms—cellular automata, ant colony algorithm, and genetic algorithm—is conducted for generating alternative routes. A method for selecting the optimal flight strategy from alternative routes has been improved by ranking the routes relative to three strategies: minimum distance, minimum time, and minimization of aircraft losses. The application of the cellular automaton method allows for the calculation of all significant factors of the operational situation, i.e., cells with a “penalty” coefficient, which correspond to the respective threat level to the aircraft. The result is the selection of the optimal aviation flight route.

Key words: flight route, flight planning, airstrike, cellular automaton, suppression of enemy air defense.

References

1. Poluiko, O.M., Onypchenko, P.M., Tymoshenko, O.V., & Koretskyi, V.Ia. (2018). Methodology for optimizing the route for tactical aviation units to penetrate enemy air defense. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Systems of Arms and Military Equipment]*, 4(56), 48–51. DOI: 10.30748/soivt.2018.56.07. Available at: <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.56.07>.
2. Semeniuta, M.F., Yakymenko, S.M., & Osadchyi, S.I. (2025). Optimal route planning for unmanned aerial vehicles for effective coverage of a given territory. *Tsentralnoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky [Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences]*, 12 (43, part I), 31–43. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.31-43. Available at: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.31-43](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.31-43).
3. Vorotnikov, V., Gumenyuk, I., & Pozdniakov, P. (2023). Planning the flight routes of the unmanned aerial vehicle by solving the travelling salesman problem. *Technology Audit and Production Reserves*, 4/2(36), 44–49. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.108537. Available at: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.108537>.
4. Udodova, O., & Vovchuk, S. (2025). Optimization of the shortest route for military operations using MS Excel and Wolfram Mathematica. *Fizyko-matematychna osvita [Physics and Mathematics Education]*, 2(40), 57–62. DOI: 10.31110/fmo2025.v40i2-08. Available at: <https://doi.org/10.31110/fmo2025.v40i2-08>.
5. Huliannytskyi, L.F., & Rybalchenko, O.V. (2023). Route optimization in planning missions of hybrid transport systems “drone + vehicle”. *Kibernetika ta kompiuterni tekhnolohii [Cybernetics and Computer Technologies]*, (3), 44–58. DOI: 10.34229/2707-451X.23.3.4. Available at: <https://doi.org/10.34229/2707-451X.23.3.4>.
6. Vorobiov, Ye.S., Pavlenko, M.A., Khliebnikov, Ye.Iu., & Hladyshev, M.H. (2018). Using a cellular automaton in the method of selecting a flight route option for strike aircraft to engage ground targets. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Systems of Arms and Military Equipment]*, 1(53), 84–90. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2018_1_14.
7. Nykyforov, O.V., Smyk, S.I., Martynenko, P.M., Sytnyk, Yu.B., & Mohylatenko, A.S. (2021). Calculation of the tactical radius of action for aircraft with turbojet engines using a reduced set of input data. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Systems of Arms and Military Equipment]*, 4(68), 40–48. DOI: 10.30748/soivt.2021.68.06. Available at: <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.68.06>.
8. Udodova, O., & Vovchuk, S. (2025). Optimization of the shortest route for military operations using MS Excel and Wolfram Mathematica. *Fizyko-matematychna osvita [Physics and Mathematics Education]*, 2(40), 57–62. DOI: 10.31110/fmo2025.v40i2-08. Available at: <https://doi.org/10.31110/fmo2025.v40i2-08>.
9. Huliannytskyi, L.F., & Rybalchenko, O.V. (2023). Route optimization in planning missions of hybrid transport systems “drone + vehicle”. *Kibernetika ta kompiuterni tekhnolohii [Cybernetics and Computer Technologies]*, (3), 44–58. DOI: 10.34229/2707-451X.23.3.4. Available at: <https://doi.org/10.34229/2707-451X.23.3.4>.
10. Costley, A., Christensen, R. C., Leishman, R., & Droge, G. N. (2022). Analytical aircraft state and imu signal generator from smoothed reference trajectory. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 58(3), 2517–2530. DOI: 10.1109/TAES.2021.3090740. Available at: <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3090740>.
11. Murugananthan, V., Rehan, M. Y. E. S., Srinivasan, R., Kavitha, M., & Kavitha, R. (2023). Traveling Salesman Problem with Ant Colony Optimization. In 2-nd International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA). DOI: 10.1109/ICECAA58104.2023.10212262. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICECAA58104.2023.10212262>.
12. Uddin, F., Riaz, N., Manan, A., Mahmood, I., Song, O.-Y., Malik, A. J., & Abbasi, A. A. (2023). An Improvement to the 2-Opt Heuristic Algorithm for Approximation of Optimal TSP Tour. *Applied Sciences*, 13(12), 7339. DOI: 10.3390/app13127339. Available at: <https://doi.org/10.3390/app13127339>.
13. Babych, V., Kostenko, A., Plesha, V., Plesha, M., & Khmiliarchuk, L. (2023). The shortest path problem: a comparative analysis of main algorithms. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (2), 99–106. DOI: 10.32782/IT/2023-2-12. Available at: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-2-12>.
14. Vorotnikov, V., Gumenyuk, I., & Pozdniakov, P. (2023). Planning the flight routes of the unmanned aerial vehicle by solving the travelling salesman problem. *Technology Audit and Production Reserves*, 4/2(36), 44–49. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.108537. Available at: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.108537>.