

## РОЗРОБКА МЕТОДУ ОПТИМАЛЬНОГО ВИБОРУ МАРШРУТІВ ПОЛЬОТІВ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Ігор Артёмов<sup>1</sup>, Дмитро Крицький<sup>2</sup>, Аліна Артёмова<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Національний аерокосмічний університет (ХАІ),  
кафедра інформаційних технологій проектування, Харків, Україна

<sup>1</sup> E-mail: i.artomov@khai.edu, ORCID: 0009-0001-5368-2469

<sup>2</sup> E-mail: d.krickiy@khai.edu, ORCID: 0000-0003-4919-0194

<sup>3</sup> E-mail: a.artymova@khai.edu, ORCID: 0000-0002-6761-2066

© Артёмов І., Крицький Д., Артёмова А., 2025

У статті здійснено глибоке дослідження інноваційних підходів до удосконалення методики розробки планів польоту безпілотних літальних апаратів, зокрема у контексті підвищення ефективності планування маршрутів за умов мінливих експлуатаційних факторів. Вперше здійснено комплексну оцінку ефективності вибору оптимального маршруту серед різних розроблених варіантів, що дозволяє значно зменшити час і ресурси, необхідні для виконання завдання. Однією з основних цілей цього дослідження є інтеграція новітніх алгоритмів оптимізації в існуючі платформи безпілотних літальних апаратів, що дозволяє здійснювати адаптацію до змін навколишнього середовища в реальному масштабі часу.

Зокрема, в роботі представлені нові підходи до оцінки та вибору оптимальних маршрутів, що враховують складні топографічні умови, динамічні фактори, як-от зміни погодних умов, а також суворі часові та ресурсні обмеження. Запропоновані алгоритми використовують передові методи оптимізації, такі як генетичні алгоритми, методи розв'язання задач за допомогою штучних нейронних мереж, а також адаптивні стратегії прогнозування. Всі ці інструменти інтегровані з потужними географічними інформаційними системами, що значно покращує точність маршруту та забезпечує можливість динамічного коригування в реальному часі.

Ключовим аспектом є також мінімізація енергоспоживання та тривалості польоту, що критично важливо для підвищення ефективності та зниження витрат на експлуатацію безпілотних літальних апаратів. У роботі обґрунтовано, чому запропоновані підходи є більш ефективними, ніж існуючі методики, і як вони дозволяють досягти значних переваг у ряді реальних сценаріїв, таких як пошукові операції, моніторинг навколишнього середовища та доставка вантажів.

Порівняльний аналіз показав, що нові методи забезпечують кращі результати не тільки за ефективністю маршруту, але й за здатністю адаптуватися до непередбачених змін умов навколишнього середовища. Результати дослідження можуть мати значний вплив на подальший розвиток програмного забезпечення для безпілотних літальних апаратів, розширюючи можливості для розроблення систем керування польотом нового покоління, здатних забезпечити більш надійні та ефективні операції в різноманітних додатках.

У перспективі планується проведення реальних випробувань розроблених моделей, що дозволить верифікувати ефективність запропонованих методів на практиці та оцінити їх застосовність у різних умовах експлуатації.

Ключові слова – методологія оцінки, планування маршруту, безпілотні літальні апарати, оптимізація маршруту, ефективність польоту, алгоритми планування, управління польотом.

### **Постановка проблеми**

У сучасних умовах широкого впровадження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у різні сфери діяльності – від сільського господарства до військових та рятувальних операцій – актуальним постає питання оптимального планування маршрутів їхніх польотів. Ефективність виконання завдань за допомогою БПЛА значною мірою залежить від якості розробленого маршруту, що має враховувати не лише технічні характеристики апарата, а й зовнішні умови, загрози та обмеження.

Створення маршрутів здійснюється з використанням сучасних алгоритмічних методів, у тому числі засобів штучного інтелекту та оптимізації. Проте серед великої кількості можливих варіантів виникає необхідність у розробленні методології, яка б дозволяла об'єктивно оцінювати ефективність кожного плану польоту. Так як існуючі методології часто мають обмеження щодо здатності адаптуватися до мінливих умов навколишнього середовища, часових та енергетичних обмежень, що призводить до зниження ефективності використання ресурсів. Така оцінка є критично важливою для прийняття рішень щодо вибору найкращого маршруту у конкретних умовах експлуатації. Тому актуальним є розроблення нової методики оцінки ефективності маршруту, що включає комплексний підхід до управління польотом БПЛА.

З розвитком технологій БПЛА дедалі активніше використовуються для виконання широкого спектру завдань у різних галузях. Одним з ключових етапів їх ефективного застосування є планування маршруту польоту, яке повинно забезпечити мінімізацію витрат ресурсів, максимальну безпеку, точність виконання місії та адаптивність до змін навколишнього середовища. Попри наявність великої кількості методів побудови маршрутів, гостро стоїть проблема об'єктивної оцінки ефективності таких маршрутів з урахуванням комплексу критеріїв, таких як довжина шляху, енергоспоживання, уникнення перешкод, ризики, погодні умови тощо. Відсутність уніфікованої методології оцінювання планів маршруту ускладнює порівняння альтернативних варіантів і обґрунтований вибір найоптимальнішого плану. Наявні підходи або орієнтовані на окремі вузькі аспекти, або мають обмежене практичне застосування через високу складність чи недостатню адаптивність до динамічних змін у середовищі. Це зумовлює необхідність у створенні системного підходу до оцінки ефективності планів маршруту БПЛА, який би враховував багатofакторну природу задачі та забезпечував оптимізацію прийняття рішень.

Проблема, яка виникає під час планування, полягає у виборі оптимального маршруту польоту. Врахування вищезазначених факторів ускладнює процес прийняття рішення. Тому розроблення ефективних методів та подальше підвищення ефективності роботи існуючих моделей БПЛА залишається актуальним завданням. Зокрема, критерії ефективності планування маршруту польоту та фактори, що впливають на літальний апарат, потребують подальшого дослідження. Наслідки проблеми проявляються в зниженні продуктивності, підвищених ризиках для безпеки та обмеженнях щодо масштабованості додатків БПЛА. Неефективне планування маршруту призводить до збільшення часу виконання завдань і збільшення витрат ресурсів, значно знижуючи загальну ефективність операцій. У той же час недостатня точність маршруту збільшує ймовірність аварій, порушень правил повітряного руху або зриву місії, створюючи значні загрози не тільки для самого літального апарату, але й для безпеки інших учасників повітряного руху. Крім того, труднощі в оцінці ефективності маршруту ускладнюють інтеграцію БПЛА в складніші системи, такі як логістика або оборонні операції, обмежуючи їх масштабованість і адаптованість до різних сценаріїв застосування в дуже складних середовищах.

Проблема планування маршруту польоту літального апарату є однією з найважливіших і актуальних тем у галузі авіаційної та робототехніки. Зокрема, планування маршруту для пошуку об'єктів є ключовим аспектом багатьох місій, включаючи моніторинг стаціонарних об'єктів, спостереження за динамічними цілями та збереження ресурсів за мінливих обмежень.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Одним із перших кроків у вирішенні розглянутих проблем є автоматизоване планування маршруту пошуку стаціонарних об'єктів з урахуванням результатів їх розпізнавання. Berezhnoy, Kalacheva & Rozhkov (2019) у роботі запропонували метод, що дозволяє в режимі реального часу модифікувати

маршрут польоту БПЛА на основі ранжування об'єктів за важливістю та застосування імплікаційного аналізу на основі теорії симплексів. Цей підхід дає змогу адаптувати маршрути в динамічних умовах, що робить його надзвичайно корисним для автоматизованого планування з урахуванням змін обмежень місії та цілей. Особливу увагу привертають роботи над спільними місіями БПЛА, такі як дослідження модифікованих алгоритмів оптимізації роїв частинок для планування траєкторій у задачах пошуку та стеження. Для бездротових сенсорних мереж і оптимізації маршруту на основі енергетичних характеристик сенсора було запропоновано динамічне програмування та методи аналізу енергетичних даних, що дозволяє коригувати маршрут для досягнення оптимальних результатів у місіях пошуку та спостереження (Berezhnoy & Kryzhanovsky (2020).

Delle Fave, Xu, Rogers & Jennings (2016) фокусуються на координації групи БПЛА для пошуку динамічної цілі з використанням алгоритму максимальної суми, що підвищує ефективність місії за рахунок скоординованих дій кількох транспортних засобів. Jin, Liao, Minai & Polycarpou (2006) запропонували методологію розподілу завдань між БПЛА, які беруть участь у пошуковій місії, з використанням колективних пошукових алгоритмів для забезпечення максимального охоплення району пошуку та ефективного використання ресурсів.

Розроблено методику планування повітряної розвідки, що враховує специфіку лісистої місцевості. Це знижує ризики втрати БПЛА та підвищує точність виявлення цілей, що наведено у публікаціях Timochko, Tristan, Chernavina & Berezhnoy (2020), Artomova, & Artomov (2025a). Критерії оцінки ефективності повітряної розвідки, запропоновані в цих дослідженнях, дозволяють об'єктивно оцінити виконання завдань і внести корективи в процес планування. Водночас застосовується динамічне програмування, засноване на принципі Беллмана, для маршрутизації БПЛА під час спостереження за стаціонарними об'єктами (Galinsky, & Kulish, 2023).

Важливим аспектом є врахування метеорологічних умов, що важливо для ефективного планування місії. Наприклад, було представлено програмне забезпечення METPASS, яке дозволяє оптимізувати планування траєкторії польоту БПЛА з урахуванням погодних факторів, значно підвищуючи ефективність місії (Kamate & Yilmazer, 2015). Інші методи автоматизованого планування маршруту з урахуванням пріоритетів пошуку об'єктів включають використання імплікаційного аналізу для коригування траєкторії в реальному часі (Lee & Yeom, 2018). Для оптимізації часу виконання завдання використовуються алгоритми мурашиних колоній, що дозволяють враховувати мінімальну та максимальну швидкості руху (Plastiras, Kyrkou, & Theocharides, 2018).

Oleksenko & Garasimenko (2021) й Artomova & Artomov (2025b) досліджують переваги алгоритмів мурашиних колоній для планування маршруту БПЛА, а також скорочення часу виконання завдання з огляду на обмеження швидкості та часу.

Druzhinin, Kovalevsky, Pogudina, & Cheranovsky (2021) у своєму дослідженні зосередилися на контролі повітряного простору під час планування маршруту БПЛА, обговорюючи методи захисту від «перешкод» та використання спеціальних систем стеження.

Для підвищення точності виконання завдань і зменшення впливу людського фактору активно використовуються інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень, які сприяють своєчасному та обґрунтованому прийняттю рішень (Sopov, Krytskyi, Artomova, & Artomov, 2025, Novichenko & Artomova, 2024). Chumak, Dudko, & Dmitriyev (2024) досліджували алгоритми планування маршруту для груп БПЛА, що поєднують традиційні та інтелектуальні методи, включаючи алгоритми Дейкстри, криві Дюбіна, метод швидкого маршу, діаграми Вороного, алгоритми локального планування маршруту.

Zhang, Xin, Dou, Chen, & Hirota (2020) провели класифікацію та статистичний аналіз спільного планування маршруту БПЛА з урахуванням трьох основних факторів: місії, екіпажу та середовища. Однак у цьому дослідженні не запропоновано конкретного алгоритму планування польоту для груп БПЛА.

Zhao, Liu, Yu, & Li (2021) детально обговорюють стохастичні евристичні алгоритми (SHA) для спільного планування маршруту БПЛА, описують їх використання для підвищення ефективності спільного планування маршруту, хоча алгоритми, які не включають SHA, не розглядаються.

Крім того, алгоритми ройового інтелекту для співпраці БПЛА, включаючи уникнення зіткнень, розподіл завдань, планування маршруту та рекомбінацію формації, досліджуються в роботі, де представлено п'ять основних категорій алгоритмів планування: оптимізація, на основі графів, евристичний, ройовий інтелект та алгоритми нейронної мережі (Sun & Hao, 2021).

У той же час удосконалено методику оцінки ефективності планів польоту БПЛА I класу, зокрема використання лінгвістичної шкали для визначення загального показника ефективності (Gorbach & Bondarenko, 2020).

Загалом планування маршруту БПЛА є складним і багатогранним процесом, який потребує застосування різноманітних методів і алгоритмів, що охоплюють як традиційні, так і інтелектуальні підходи. Найбільш перспективними є методи, які дозволяють адаптувати маршрут до мінливих умов і координувати роботу кількох літальних апаратів для досягнення високої ефективності місії. Розподіл дослідників і наукових установ по країнах, які залучені до вирішення питань планування маршруту БПЛА, виражений у відсотках, може бути приблизним, оскільки точні дані про кількість дослідників, які працюють у конкретних країнах, важко виміряти. Однак можна приблизно оцінити пропорційний внесок окремих країн, виходячи з їхніх наукових досягнень та інвестицій у розвиток технологій літальних апаратів. Наближений розподіл представлений на рис.1.



Рис. 1. Пропорційний внесок країн у дослідження планування маршруту БПЛА.

Джерело: Розроблено авторами.

Аналіз проблем свідчить про необхідність удосконалення методології планування маршруту з метою підвищення ефективності та точності виконання завдань БПЛА.

### Формулювання цілі статті

Метою даного дослідження є розроблення методології оцінки ефективності створених планів маршруту польоту БПЛА з урахуванням комплексного аналізу факторів, що впливають на виконання завдань, та обґрунтування критеріїв оптимального вибору. Запропонований підхід спрямований на підвищення надійності та результативності застосування безпілотних систем.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі завдання:

- провести аналіз сучасних методів планування маршрутів польоту БПЛА та підходів до їх оцінки;
- визначити основні фактори, що впливають на ефективність маршруту (технічні, навігаційні, зовнішні умови тощо);

- розробити систему критеріїв оцінки ефективності планів маршрутів з урахуванням багатфакторного підходу;
- створити математичну модель або алгоритм для порівняльного аналізу альтернативних маршрутів;
- розробити програмне забезпечення для реалізації запропонованої методології з можливістю її адаптації до різних типів БПЛА та умов експлуатації.

Об'єкт дослідження - процес планування та оцінки маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів у різних умовах експлуатації.

Предмет дослідження - методи та алгоритми оцінки ефективності створених планів маршруту польоту БПЛА з урахуванням множини факторів та критеріїв оптимального вибору.

Наукова новизна дослідження полягає в розробленні узагальненої методології оцінки ефективності маршрутів БПЛА, яка базується на поєднанні багатокритеріального аналізу та моделювання умов експлуатації. Запропоновано новий підхід до порівняння альтернативних маршрутів, що враховує як внутрішні параметри апарата, так і зовнішні впливи, що дозволяє підвищити точність і надійність вибору оптимального плану польоту.

### Виклад основного матеріалу

БПЛА можна класифікувати за різними категоріями на основі факторів планування маршруту:

1. Застосування, до яких відносять:
  - військові БПЛА. Маршрути військових місій часто вимагають високої конфіденційності та уникнення зон обмеженого доступу;
  - цивільні БПЛА. Використовуються для таких завдань, як аерофотозйомка, моніторинг навколишнього середовища або пошуково-рятувальні роботи, маршрути встановлюються відповідно до потреб клієнта та зон безпеки.
2. Розмір і радіус дії:
  - БПЛА малої дальності потребують формування прямого маршруту, який підходить для коротких польотів на невеликі відстані;
  - мікро БПЛА через невеликі розміри мають обмеження щодо дальності польоту;
  - нано БПЛА ще менші за розміром і зазвичай обмежені у функціональності;
  - малі БПЛА використовуються для таких місій, як спостереження або розвідка;
  - БПЛА великої дальності використовуються для польотів на великі відстані, для них потрібне детальне планування;
  - середні БПЛА використовуються для різноманітних завдань;
  - великі БПЛА здатні перевозити важке обладнання або зброю.
3. Конструкція та режим польоту:
  - з нерухомим крилом ефективні для тривалих польотів на великі відстані;
  - мультиротор (квадрокоптери) використовує багатороторну конструкцію для стабільного польоту на короткі відстані;
  - схожий на вертоліт і його характеристики, подібні до гелікоптерів з одним або декількома гвинтами;
  - гібрид моделі поєднують різні типи польоту для оптимізації якості польоту та економії палива.
4. Використана технологія:
  - автономні БПЛА здатні виконувати завдання без прямого керування оператором;
  - дистанційне пілотування потребує прямого керування або нагляду оператора.

БПЛА можуть використовувати GPS та інші навігаційні системи для визначення місцезнаходження та планування маршруту.

Ця узагальнена класифікація БПЛА представлена на рис 2.

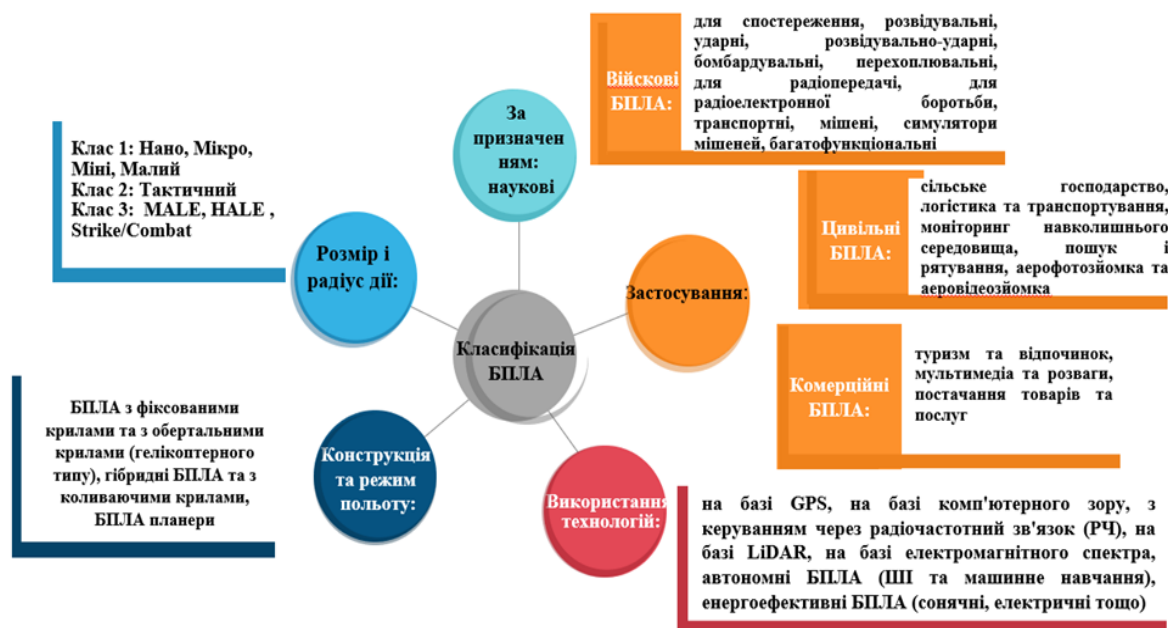


Рис. 2. Класифікація БПЛА.

Джерело: розроблено авторами.

Розроблена методика є універсальною та рекомендована для використання як на військових, так і на цивільних літаках будь-якої конструкції та способу польоту. Це особливо актуально для розрахунку маршруту на короткі відстані, оскільки не враховує можливість планування зупинок для підзарядки або дозаправки.

Методика охоплює різні групи параметрів, необхідних для оцінки маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів. Однак це також забезпечує гнучкість для майбутнього розширення, дозволяючи включати додаткові фактори в параметри або навіть нові параметри, залежно від конкретних необхідних умов. Оцінювання маршрутів польоту БПЛА включає в себе розгляд різних показників, які визначають ефективність місії, регулярність, безпеку та успіх (див. рис. 3).

Для якісного оцінювання ефективності планування маршруту польоту літальних апаратів рекомендуються наступні показники:

Ефективність планування маршруту (A), що включає такі фактори, як тривалість місії, споживання палива, використання ресурсів, необхідних для виконання завдання, та інші фактори, що впливають на вартість і продуктивність маршруту (Artomova & Artomov, 2025), зокрема:

- довжина маршруту (A1) передбачає мінімізацію пройденої відстані для зменшення споживання ресурсів і підвищення ефективності використання БПЛА;
- час виконання завдання (A2), необхідний для виконання завдання, включаючи маневри та зупинки. Зменшення часу виконання завдання покращує загальну продуктивність;
- вартість місії (A3) та вартість ресурсів, включаючи електроенергію, амортизацію БПЛА та витрати на персонал. Мета полягає в тому, щоб мінімізувати ці витрати.

Регулярність і надійність (B) потребує оцінювання частоти та стабільності виконання маршруту. Для БПЛА вкрай важливо виконувати заплановані місії без непотрібних затримок або перерв:

- частота місій (B1) враховує частоту успішно виконаних запланованих польотів. Максимізація цього забезпечує стабільне виконання завдань у заплановані терміни;
- перерви в плануванні та виконанні місії (B2) враховує частоту збоїв обладнання або програмного забезпечення. Мета полягає в тому, щоб мінімізувати такі перерви;
- середній час підготовки до місії (B3) передбачає врахування тривалості процесу планування маршруту. Мінімізація цього забезпечує швидке реагування на оперативні потреби.

Успіх місії (C) - це оцінювання успішності виконання конкретного завдання, покладеного на БПЛА. Це може включати достовірність зібраної інформації, доставку та розповсюдження необхідних матеріалів або допомогу в надзвичайних ситуаціях (Gorbach & Bondarenko, 2020, Gulyanitsky & Dubina, 2021):

- точність зібраної інформації (C1) - мінімальне відхилення фактичного маршруту від запланованого. Максимальна точність досягнення контрольних точок;
- можливість реагування на надзвичайні ситуації (C2) передбачає можливість змінювати маршрут у режимі реального часу у разі непередбачених обставин, таких як зміни погоди чи перешкоди;
- доставка та розподіл необхідних матеріалів (C3) включає максимізацію спроможності виконання ефективних логістичних операцій.

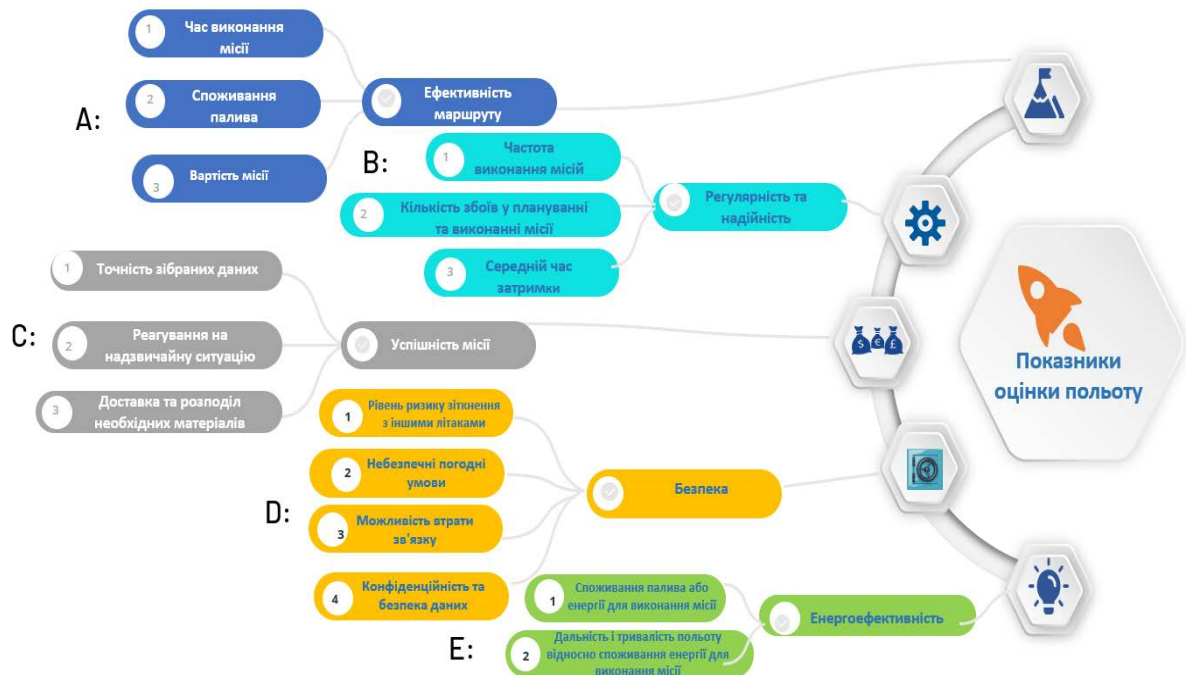


Рис. 3. Фактори для оцінки планування маршруту польоту безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що включають різні метрики.

Джерело: розроблено авторами.

Безпека (D) – це оцінювання потенційних загроз безпеці під час польотів, включаючи ризик зіткнення з іншими літальними апаратами, небезпечні погодні умови, втрата зв'язку тощо. Також розглядається безпека та конфіденційність даних під час збору та передачі даних БПЛА. Оцінка безпеки польотів включає кількісні та якісні показники, що враховують технічні, експлуатаційні та екологічні аспекти:

- ризик зіткнення з іншими літальними апаратами (D1) – здатність інтегрувати БПЛА в повітряний простір з мінімальними ризиками для інших літальних апаратів (наприклад, літаків, гелікоптерів). Мета полягає в тому, щоб мінімізувати загрозу втрати БПЛА або завдання;
- ризик втрати зв'язку (D2) розглядається як мінімізація ризиків, пов'язаних із втратою контролю над БПЛА;
- конфіденційність і безпека даних (D3) сприяють забезпеченню найвищого рівня захисту від несанкціонованого доступу до даних;
- небезпечні погодні умови (D4) передбачають здатність БПЛА виконувати завдання за складних умов, таких як сильний вітер, дощ або коливання температури. Максимальне використання цих можливостей має вирішальне значення.



Енергоефективність (Е) – це оцінювання успішності виконання конкретного завдання, покладеного на БПЛА. Це може включати достовірність зібраної інформації, доставку та розповсюдження необхідних матеріалів або допомогу в надзвичайних ситуаціях (Gorbach & Bondarenko, 2020, Gulyanitsky & Dubina, 2021):

- споживання палива або електроенергії для виконання місії (E1) передбачає мінімізацію споживання ресурсів для підвищення ефективності витрат;
- дальність польоту та тривалість відносно споживання енергії (E2) розглядаються як максимізація тривалості польоту або виконання завдання без необхідності дозаправки або заміни акумулятора.

Такий підхід забезпечує комплексну оцінку ефективності процесів обрання маршруту БПЛА та підтримує їх оптимізацію для практичного впровадження або допомогу в екстрених ситуаціях (Gorbach & Bondarenko, 2020, Gulyanitsky & Dubina, 2021). Ці показники можна розглядати як окремо, так і в сукупності залежно від конкретного типу місії, умов польоту та вимог замовника. Крім того, можуть бути інші конкретні показники, які розглядаються на основі потреб конкретної місії або застосування БПЛА (Shafik, Matinkhah, Shokoor, & Sharif, 2022).

Ймовірність ураження БПЛА (через засоби ППО противника в районі розвідки) –  $P_{eff}$ . Цей показник є ключовим з огляду на високу вартість і низьку адаптованість БПЛА до систем ППО противника.

$$P_{eff} = F(A_i, B_i, C_i, D_i, E_i) \quad (1)$$

$$A_i, B_i, C_i, D_i, E_i \in \Omega \quad (2)$$

де  $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i = K_i$  – критерій ефективності процесу планування маршруту, який може змінюватися в межах конкретного діапазону  $\Omega$ ;  $\Omega$  – критерій ефективності процесу планування маршруту, що може варіюватися в межах певного діапазону  $\Omega$ .

Критерії ефективності процесу планування маршруту польоту БПЛА визначаються такими факторами як ціль місії; ймовірність зриву місії; часові параметри та параметри, що визначають технічні можливості системи БПЛА. Виходячи з фізичної сутності та напрямків оптимізації процесу планування маршруту, систему критеріїв оцінки ефективності плану маршруту польоту БПЛА можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} A &\rightarrow \min(A1 \rightarrow \min, A2 \rightarrow \min, A3 \rightarrow \min) \\ B &\rightarrow \max(B1 \rightarrow \max, B2 \rightarrow \min, B3 \rightarrow \min) \\ C &\rightarrow \max(C1 \rightarrow \max, C2 \rightarrow \max, C3 \rightarrow \max) \\ D &\rightarrow \max(D1 \rightarrow \min, D2 \rightarrow \min, D3 \rightarrow \max, D4 \rightarrow \max) \\ E &\rightarrow \min(E1 \rightarrow \min, E2 \rightarrow \max) \end{aligned} \quad (3)$$

Формування функції ефективності ( $P_{eff}$ ) процесу планування маршруту для альтернатив у певному діапазоні  $\Omega$  досягається зведенням векторного критерію до скалярного критерію з використанням різних типів агрегування, у тому числі адитивного:

$$P_{eff}(K_i) = \sum \alpha_i K_i \quad (4)$$

$$\sum \alpha_i = 1 \quad (5)$$

де  $\alpha_i$  – ваговий коефіцієнт показника ефективності процесу планування маршруту.

До переваг обраної схеми оптимізації процесу планування маршруту також можна віднести наявність вагових коефіцієнтів переваги показників. Цей коефіцієнт дозволяє особі, яка планує маршрут польоту, визначити пріоритетність будь-якого показника ефективності в залежності від конкретних завдань, що виконуються. Вони нерівні і залежать від кількості показників. Таким чином, у нашому випадку  $\alpha_1=1/5$ ,  $\alpha_2=1/5$ ,  $\alpha_3=1/5$ ,  $\alpha_4=4/15$ ,  $\alpha_5=2/15$ . Результати розрахунків укрупнених показників ефективності планування маршруту польоту БПЛА представлені у вигляді таблиці 1, де мінімальне значення укрупненого показника ефективності процесу планування маршруту відповідає оптимальному плану маршруту польоту.



Таблиця 1.

**Результати розрахунків укрупнених показників  
ефективності процесу планування маршруту польоту БПЛА**

| Значення показників ефективності ( $K_i$ ) |                 | Попередній план ( $n$ ) |           |           |
|--------------------------------------------|-----------------|-------------------------|-----------|-----------|
|                                            |                 | $a$                     | $b$       | $c$       |
| $A (min)$                                  | $A_1 (min)$     | $A_1 a_1$               | $A_1 b_1$ | $A_1 c_1$ |
|                                            | $A_2 (min)$     | $A_2 a_2$               | $A_2 b_2$ | $A_2 c_2$ |
|                                            | $A_n (max/min)$ | $A_n a_n$               | $A_n b_n$ | $A_n c_n$ |
| $B (max)$                                  | $B_1 (max)$     | $B_1 a_1$               | $B_1 b_1$ | $B_1 c_1$ |
|                                            | $B_2 (min)$     | $B_2 a_2$               | $B_2 b_2$ | $B_2 c_2$ |
|                                            | $B_n (max/min)$ | $B_n a_n$               | $B_n b_n$ | $B_n c_n$ |
| $K_i (max/min)$                            | $K_n (max/min)$ | $K_n a_n$               | $K_n b_n$ | $K_n c_n$ |

Інтерпретація отриманих результатів передбачає переведення результатів оцінювання в уніфіковану шкалу, наприклад, від 0 (найгірше) до 1 (найкраще). Це досягається нормуванням значень критеріїв оцінювання в діапазоні від 0 до 1, при цьому найкраще значення встановлюється рівним 1, а найгірше значення – 0. До переваг обраної схеми оптимізації процесу планування маршруту також відноситься наявність вагових коефіцієнтів переваги показників.

Абсолютних значень укрупнених показників ефективності процесу планування маршруту недостатньо для прийняття рішення про ефективність розвідки БПЛА на основі обраного набору показників. Тому для прийняття рішення про ефективність плану необхідний перехід від абсолютного значення укрупненого показника ефективності процесу планування маршруту до лінгвістичної категорії типу «добре-погано». Нормалізацію оцінки  $P_{eff}$  можна здійснити за допомогою наступного виразу.

$$P_{eff_i} = \frac{P_{eff_{min}}}{P_{eff_n}} \quad (6)$$

де  $P_{eff_{min}}$  – мінімальне значення агрегованого показника ефективності процесу планування маршруту польоту;  $P_{eff_i}$  – розраховане значення агрегованого показника ефективності процесу планування маршруту польоту;  $n$  – кількість варіантів планів маршрутів польоту БПЛА, які оцінюються.

Нормований агрегований показник оцінюється за лінгвістичною шкалою оцінки ефективності плану маршруту польоту БПЛА (від 0,7 до 1,0 = висока ефективність; 0,5 – 0,7 = хороша ефективність; 0,4 – 0,5 = задовільна ефективність).

Програма, розроблена на Java, призначена для визначення оптимального маршруту з урахуванням різних комбінацій факторів для кожного параметра, що використовується в розрахунках. Для полегшення розуміння та аналізу, результати представлені в таблиці 2, де показано, як змінюються фактори та їхній вплив на оптимізацію маршруту за різних умов.

Таблиця 2.

**Комбінації факторів для оптимізації маршруту за різних умов**

| Значення показників ефективності ( $K_i$ ) | Попередній план ( $n$ ) |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                            | 1                       | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   |
| $A_1 (min)$                                | 0.1                     | 0.3 | 0.2 | 0.5 | 0.7 | 0.4 | 0.9 |
| $A_2 (min)$                                | 0.2                     | 0.4 | 0.1 | 0.6 | 0.8 | 0.3 | 0.5 |
| $A_3 (min)$                                | 0.5                     | 0.3 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.9 |
| $B_1 (max)$                                | 0.8                     | 0.6 | 0.4 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
| $B_2 (min)$                                | 0.3                     | 0.6 | 0.9 | 0.6 | 0.3 | 0.6 | 0.9 |
| $B_3 (min)$                                | 0.2                     | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |
| $C_1 (max)$                                | 0.7                     | 0.8 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 0.6 | 0.7 |
| $C_2 (max)$                                | 0.5                     | 0.6 | 0.3 | 0.7 | 0.3 | 0.3 | 0.5 |
| $C_3 (max)$                                | 0.3                     | 0.8 | 0.7 | 0.5 | 0.8 | 0.6 | 0.7 |
| $D_1 (min)$                                | 0.3                     | 0.2 | 0.5 | 0.3 | 0.4 | 0.7 | 0.8 |
| $D_2 (min)$                                | 0.7                     | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 0.8 | 0.4 | 0.5 |
| $D_3 (max)$                                | 0.3                     | 0.2 | 0.5 | 0.7 | 0.4 | 0.8 | 0.3 |
| $D_4 (max)$                                | 0.7                     | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.8 | 0.3 | 0.5 |
| $E_1 (min)$                                | 0.7                     | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.7 | 0.3 | 0.5 |
| $E_2 (max)$                                | 0.8                     | 0.8 | 0.7 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.7 |

Розрахунки для всіх розглянутих сценаріїв маршруту БПЛА були виконані за розробленою програмою (див. рис. 4–5), що дозволило провести комплексний аналіз та оптимізацію маршрутів за заданими параметрами та умовами.

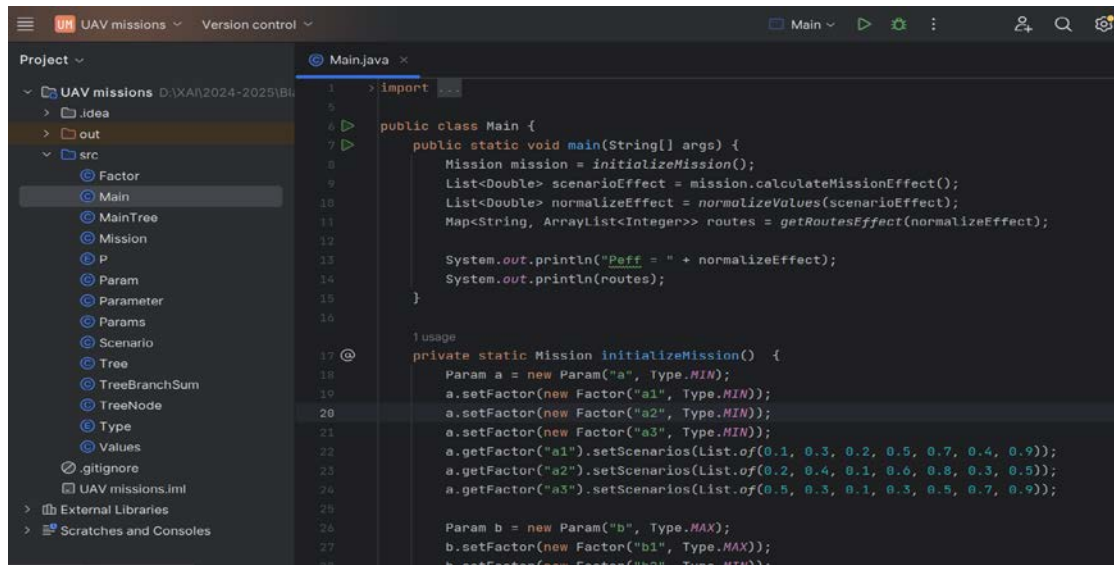


Рис. 4. Програма для розрахунку оптимальних маршрутів БПЛА

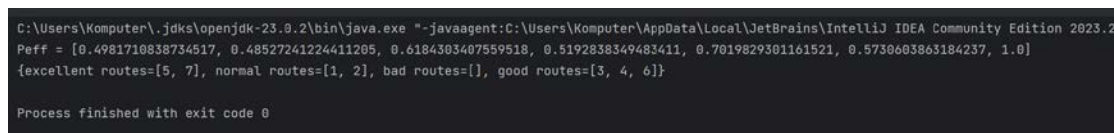


Рис. 5. Результати оптимізації маршруту БПЛА

Порядок оцінки ефективності плану маршруту польоту БПЛА з урахуванням визначених показників з моменту отримання завдання до зльоту БПЛА наведено на (див. рис. 6).

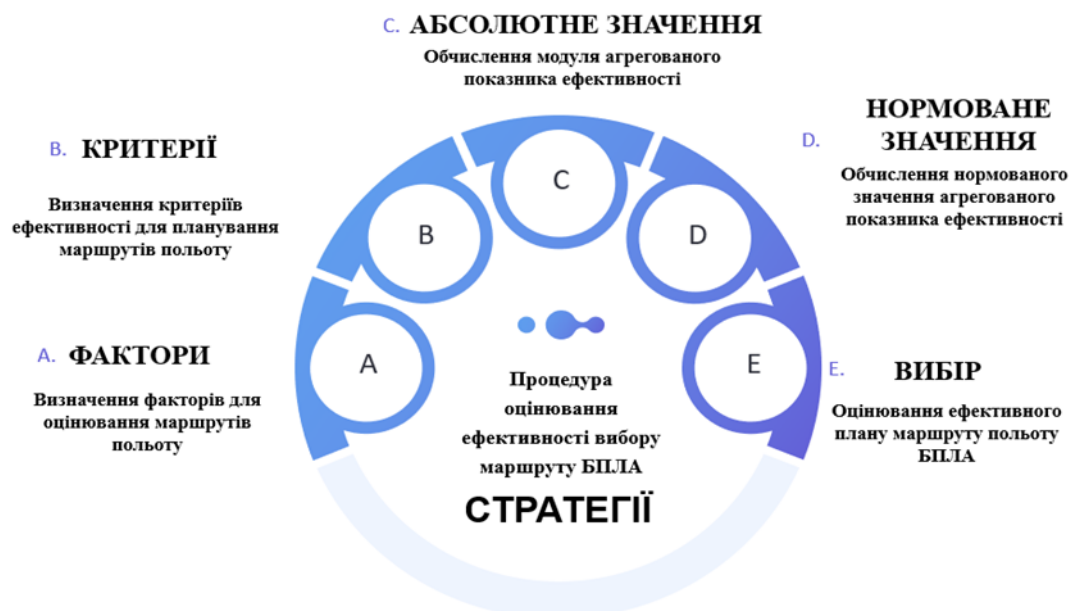


Рис. 6. Визначення множини варіантів плану маршруту, які можуть бути виконані в рамках поставленої задачі.

Джерело: розроблено авторами.

Остаточна процедура «Вибір» передбачає оцінювання та обрання найбільш ефективного плану маршруту польоту БПЛА на основі розрахованих і нормованих показників ефективності. План вибирається шляхом порівняння його продуктивності із заздалегідь визначеними критеріями, враховуючи такі фактори, як довжина маршруту, тривалість місії, споживання палива та інші відповідні показники. Для виконання вибирається план з найбільшою ефективністю, визначеною за згрупованими та нормованими значеннями.

### Висновки

Дослідження показує, що ефективність процесу планування маршруту польоту безпілотних літальних апаратів є вирішальним фактором для забезпечення успішного виконання місії. Аналіз різних критеріїв, таких як тривалість місії, споживання ресурсів, надійність виконання та безпека, дозволяє розробити комплексну методологію для оцінки ефективності планування маршруту. Розроблені показники продуктивності допомагають скоротити витрати та час на виконання місії, підвищити стабільність виконання завдань і мінімізувати ризики, пов'язані з безпекою та технічними проблемами.

Моделювання ефективності процесу планування маршруту за допомогою агрегованих показників дозволяє не тільки оцінити конкретні його варіанти, але й вибрати найбільш оптимальний для виконання завдання. Такий підхід забезпечує гнучкість у прийнятті рішень і дозволяє адаптувати плани маршрутів до конкретних умов і експлуатаційних вимог. Врахування вагових коефіцієнтів для різних показників дозволяє регулювати пріоритети залежно від конкретних завдань, що ще більше підвищує ефективність використання БПЛА в реальних умовах.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Artomova, A. & Artomov, I. (2025). Methodology for Assessing the Efficiency of Generated UAV Flight Route Plans for Optimal Selection. *Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025*. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1480. Springer, Cham. 233–243. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-95191-6\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-95191-6_22)
- Artomova, A. & Artomov, I. (2025). Optimization of UAV Routes and Efficiency Enhancement Using Modern IT Technologies. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2024. ICTM 2024*. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1473. Springer, Cham. 219–299. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-94845-9\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-031-94845-9_19)
- Berezhnoy, A. A. & Kryzhanovsky, I. M. (2020). Complex tasks of the decision support system for planning flight routes of unmanned aerial vehicles. *Control, navigation and communication systems*, 1(59), 3–6. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.003>
- Berezhnoy, A., Kalacheva, V. & Rozhkov, N. (2019). Simulation of movement of dynamic objects in the system of sub-holding decision-making planning of routes of unmanned aerial vehicles. *Information processing systems*, 4(159), 44–49. <https://journal-hnups.com.ua/index.php/soi/article/view/soi.2019.159.05/731>
- Chumak, O., Dudko, M., & Dmitriyev, O. (2024). Ontology of movement route planning methods for unmanned aerial vehicles. *Testing and Certification*, 1(3), 69–77. <https://doi.org/10.37701/ts.03.2024.10>
- Delle Fave, F. M., Xu, Z., Rogers, A. & Jennings, N. R. (2016). Decentralised Coordination of Unmanned Aerial Vehicles for Target Search using the Max-Sum Algorithm. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 30(6), 912–946. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6225053>
- Druzhinin, E. A., Kovalevsky, M. I., Pogudina, A. K. & Cheranovsky, V. A. (2021). Methods and information technologies of introduction of unmanned aerial vehicles into the airspace of Ukraine. *Weapons systems and military equipment*, 4(68), 84–90. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.68.12>
- Galinsky, D.O. & Kulish, R.V. (2023). Method of monitoring the state of stationary elements of objects of critical infrastructure by unmanned aerial vehicles using dynamic programming. *Control, navigation and communication systems*, 1(71), 10–14. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.010>
- Gorbach, V. Ya. & Bondarenko, Yu. L. (2020). Improved methodology for evaluating the effectiveness of the reconnaissance UAV I class flight route plan. *Collection of scientific works of Kharkiv National Air Force University*, 2(64), 45–52. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.64.07>
- Gulyanitsky, L. F. & Dubina, A. V. (2021). Solving the problem of placing rectangles on a semi-independent tape by local and taboo search algorithms. *Scientific Bulletin of Uzhgorod University. Mathematics and Computer Science Series*, 38(1), 123–136. [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2021.38\(1\)](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2021.38(1))

- Jin, Y., Liao, Y., Minai, A. A. & Polycarpou, M. M. (2006). Balancing Search and Target Response in Cooperative Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Teams. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 36(3), 110–123. <https://doi.org/10.1109/tsmcb.2005.861881>
- Kamate, S. & Yilmazer, N. (2015). Application of Object Detection and Tracking Techniques for Unmanned Aerial Vehicles. *Procedia Computer Science*, 61, 436–441. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.09.183>
- Lee, M.-H. & Yeom, S. (2018). Detection and Tracking of Multiple Moving Vehicles with a UAV. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 18(3), 182–189. <https://doi.org/10.5391/IJFIS.2018.18.3.182>
- Novichenko, A. S. & Artomova, A. V. (2024). Problems and tasks of planning flight routes of unmanned aerial vehicles to increase the efficiency of object search. *Information Processing Systems*, 2(177), 32–40. <https://doi.org/10.30748/soi.2024.177.04>
- Oleksenko, O. O. & Garasimenko, V. V. (2021). Method of determining flight options for an unmanned aerial vehicle based on the max-mine ant algorithm. *The current state of scientific research in IT-technologies, electronics, engineering, nanotechnology and transport sphere*, 2, 4–12. <https://doi.org/10.36074/csrte-enat.ed-2.01>
- Plastiras, G., Kyrkou, C. & Theocharides, T. (2018). Efficient ConvNet-based Object Detection for Unmanned Aerial Vehicles by Selective Tile Processing. *International Conference on Distributed Smart Cameras*, 12, 1–6. <https://doi.org/10.1145/3243394.3243692>
- Shafik, W., Matinkhah, S.M., Shokoor, F. & Sharif, L. (2022). A reawakening of Machine Learning Application in Unmanned Aerial Vehicle: Future Research Motivation. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 8(29), e3. <https://doi.org/10.4108/eetiot.v8i29.987>
- Sopov, I., Krytskiy, D., Artomova, A. & Artomov, I. (2025). Trust-based routing methodology in UAV swarm networks based on traffic analysis and anomaly detection. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2(32), 111–128. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.2.111>
- Sun, W. & Hao, M. (2021). A Survey of Cooperative Path Planning for Multiple UAVs. *International Conference on Autonomous Unmanned Systems*, 189–196. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-9492-9\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-16-9492-9_20)
- Tang, J., Duan, H. & Lao, S. (2023). Swarm intelligence algorithms for multiple unmanned aerial vehicles collaboration: a comprehensive review. *Artificial Intelligence Review*, 56, 4295–4327. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10281-7>
- Timochko, O. I., Tristan, A. V., Chernavina, A. E. & Berezhnoy, A. A. (2020). Method for planning the route for conducting aerial reconnaissance of dynamic objects using unmanned aerial vehicles in forest-steppe terrain. *Information processing systems*, 3(162), 95–110. <https://doi.org/10.30748/soi.2020.162.10>
- Zhao, C., Liu, Y., Yu, L. & Li, W. (2021). Stochastic Heuristic Algorithms for Multi-UAV Cooperative Path Planning. *40th Chinese Control Conference*, 7677–7682. <https://doi.org/10.23919/CCC52363.2021.9549984>
- Zhang, H., Xin, B., Dou, L.-H., Chen, J. & Hirota, K. (2020). A review of cooperative path planning of an unmanned aerial vehicle group. *Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering*, 21, 1671–1694. <https://doi.org/10.1631/FITEE.2000228>

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR OPTIMAL SELECTION OF UNMANNED AERIAL VEHICLE FLIGHT ROUTES

Ihor Artomov<sup>1</sup>, Dmytro Krytskiy<sup>2</sup>, Alina Artomova<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> National Aerospace University (KhAI),

Department of Information Technologies of Design, Kharkiv, Ukraine,

<sup>1</sup> Email: i.artomov@khai.edu, ORCID: 0009-0001-5368-2469

<sup>2</sup> Email: d.krickiy@khai.edu, ORCID: 0000-0003-4919-0194

<sup>3</sup> Email: a.artomova@khai.edu, ORCID: 0000-0002-6761-2066

© Artomov I., Krytskiy D., Artomova A., 2025

**This paper presents an in-depth study of innovative approaches to improving the methodology for flight planning of unmanned aerial vehicles (UAVs), particularly in the context of enhancing route planning efficiency under changing operational factors. For the first time, a comprehensive assessment**

of the effectiveness of choosing an optimal route among various developed options is conducted, significantly reducing the time and resources required to complete a mission. One of the main objectives of this research is the integration of advanced optimization algorithms into existing UAV platforms, enabling real-time adaptation to environmental changes.

The paper introduces new approaches for assessing and selecting optimal routes, taking into account complex topographical conditions, dynamic factors such as changing weather, and stringent time and resource constraints. The proposed algorithms employ advanced optimization methods, such as genetic algorithms, artificial neural network-based problem-solving techniques, and adaptive forecasting strategies. All these tools are integrated with powerful Geographic Information Systems (GIS), significantly improving route accuracy and allowing for dynamic adjustments in real time.

A key aspect of the study is the minimization of energy consumption and flight duration, which is critical for improving efficiency and reducing operational costs for UAVs. The paper justifies why the proposed approaches are more effective than existing methodologies and how they provide significant advantages in various real-world scenarios, such as search operations, environmental monitoring, and cargo delivery.

Comparative analysis shows that the new methods not only achieve better route efficiency but also enhance the ability to adapt to unforeseen changes in environmental conditions. The results of the research may have a significant impact on the future development of UAV software, expanding the possibilities for creating next-generation flight control systems capable of ensuring more reliable and efficient operations in diverse applications.

In the future, real-world testing of the developed models is planned, which will allow for the verification of the effectiveness of the proposed methods in practice and assess their applicability under different operational conditions.

**Keywords:** evaluation methodology, route planning, unmanned aerial vehicles (UAVs), route optimization, flight efficiency, planning algorithms, flight control.