

УДК 654.9

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.33>

Оксана ТИМОЩУК

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри математичних методів системного аналізу Інституту прикладного системного аналізу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0000-0003-1863-3095

Еміль ЛЮТФАЛІЄВ

аспірант Інституту прикладного системного аналізу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», eliutfaliiev@gmail.com

ORCID: 0009-0009-9070-6632

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ АТМОСФЕРНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ЇХ ПОКРАЩЕННЯ

Анотація. У статті подано структурований аналіз сучасних підходів до планування траєкторій польоту атмосферних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з акцентом на взаємозв'язок понять «траєкторія», «маршрут» і «навігація» в автономних системах керування. Узагальнено міждисциплінарні тлумачення цих категорій з урахуванням позицій авіації, теорії керування, кібернетики та штучного інтелекту, що дозволяє уточнити їх роль у логіці навігації в умовах невизначеності. Наведено порівняльний огляд методів планування, включаючи класичні кінематичні моделі, фільтрацію Калмана, евристичні алгоритми (поля потенціалів, роїння), а також інтелектуальні підходи, зокрема нейронні мережі й навчання з підкріпленням. Оцінювання здійснено за критеріями точності, адаптивності, обчислювальної складності та енергоефективності.

Результати свідчать, що класичні моделі забезпечують високу точність у структурованих умовах, однак виявляють обмеження при зміні зовнішнього середовища. Натомість методи ШІ демонструють гнучкість та здатність до навчання, але потребують значних ресурсів і попереднього навчання. Окреслено типові обмеження в реальних умовах – складна місцевість, погодні зміни, багатобачкові рішення – та запропоновано шляхи вдосконалення: використання онлайн-навчання, генеративних моделей ШІ (GPT, дифузійні моделі), а також багатокритеріальної оптимізації. Запропоновано гібридну архітектуру планування траєкторій, що поєднує аналітичні моделі з адаптивними інтелектуальними шарами для автономного управління в змінному середовищі. Результати сприяють розвитку інтелектуальних систем підтримки рішень для БПЛА нового покоління.

Ключові слова: атмосферні літальні апарати, траєкторія руху, маршрут, навігація, автономне керування, планування траєкторії, адаптивні системи, БПЛА, алгоритми оптимізації, штучний інтелект.

Oksana TYMOSHCHUK, Emil LUTFALIEV. ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR DETERMINING THE TRAJECTORIES OF ATMOSPHERIC AIRCRAFT FOR THE POSSIBILITY OF THEIR IMPROVEMENT

Abstract. The article provides a structured analysis of current approaches to flight trajectory planning for atmospheric unmanned aerial vehicles (UAVs), emphasizing the conceptual interplay between «trajectory», «route», and «navigation» within autonomous control systems. The research generalizes interdisciplinary interpretations of these terms, drawing from aviation, control theory, cybernetics, and artificial intelligence, to clarify their impact on navigation logic under uncertainty. A comparative review of planning methods is presented, including classical kinematic models, Kalman filtering, heuristic algorithms (e.g., potential fields, swarm optimization), and AI-driven techniques such as neural networks and reinforcement learning. These approaches are evaluated based on accuracy, adaptability, computational cost, and energy efficiency. Findings show that classical methods offer precision and predictability in structured settings, but struggle to adapt to dynamic environments. AI methods demonstrate higher adaptability and learning potential but require significant computational resources and training datasets. The article outlines key limitations typical for complex missions – such as unpredictable weather, urban obstacles, and real-time decision-making across multiple agents – and proposes directions for improvement. Suggested solutions include the integration of online learning, the use of generative AI models (e.g., GPT, diffusion models), and the implementation of multi-objective optimization techniques tailored to operational constraints.

The study introduces a hybrid trajectory planning architecture combining deterministic models with intelligent adaptive layers that support autonomous control in changing environments. The proposed framework enhances UAV mission flexibility, reliability, and autonomy, contributing to the development of intelligent decision-support systems for next-generation aerial robotics.

Key words: atmospheric aerial vehicles, trajectory, route, navigation, autonomous control, trajectory planning, adaptive systems, UAVs, optimization algorithms, artificial intelligence.

Постановка проблеми. У контексті зростання використання атмосферних літальних апаратів, зокрема безпілотних, виникає потреба у розробці високоточного, адаптивного та енергоефективного планування траєкторій, здатного враховувати складність і динаміку реального середовища. Існуючі методи або обмежені в здатності реагувати на зміни, або вимагають значних обчислювальних ресурсів, що ускладнює їх використання в умовах обмежених бортових потужностей. Відсутність уніфікованого

підходу до трактування ключових понять, таких як «траєкторія», «маршрут» і «навігація», також перешкоджає інтеграції різних методів у цілісні керуючі системи.

Метою статті є здійснення системного аналізу існуючих методів формування траєкторій руху атмосферних літальних апаратів з урахуванням сучасних підходів до трактування понять «маршрут» і «навігація», оцінка ефективності відповідних алгоритмів та визначення перспективних напрямів їх удосконалення для забезпечення автономного, адаптивного й енергоефективного керування польотом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні дослідження вказують на необхідність інтеграції маршрутного і навігаційного рівнів у єдину систему, здатну до адаптації та самонавчання в умовах зовнішніх змін. Так, У роботі S.M. LaValle [8] маршрут трактується як конфігураційна послідовність точок, яка формується з урахуванням обмежень простору. P. Zarchan [10] розширює це поняття, включаючи в нього метеоумови, логістику і зони ризику. У дослідженні D. Mellinger і V. Kumar [9] маршрут розглядається як параметрична крива, оптимізована за критерієм мінімізації ривка з урахуванням динаміки апарата. Ю. Авер'янова, А. Рудякова, Ф. Яновський [1] акцентують увагу на ролі навігації в корекції траєкторії, що забезпечується метеонавігаційними сенсорами. У свою чергу, Шерстюк та ін. [6, 7] пропонують адаптивну модель, яка використовує мультисенсорні дані для перебудови маршруту в реальному часі.

Виклад основного матеріалу. Для аналізу методів формування траєкторій руху атмосферних літальних апаратів важливо уточнити значення понять «траєкторія руху», «маршрут» і «навігація». Їхні тлумачення у фаховій літературі різняться залежно від галузі, що потребує міждисциплінарної систематизації. У цьому розділі узагальнено наукові підходи до трактування цих термінів як основи для подальшого аналізу методів траєкторного планування в автономних системах керування.

У науковій літературі термін «траєкторія руху» атмосферного літального апарата досліджувався в контексті як механіки польоту, так і кібернетичних систем навігації та керування. Його трактування залежить від предметної області, в межах якої розглядається цей термін, що спричинило розмаїття підходів до його формалізації (табл. 1).

Таблиця 1

Узагальненням результатів дослідження поняття «траєкторія руху» в наукових дослідженнях

Автор	Джерело	Опис підходу до терміну «траєкторія руху»
P. Zarchan [10]	Tactical and Strategic Missile Guidance.	Траєкторія розглядається як фізично зумовлений просторово-часовий шлях об'єкта, що обчислюється на основі рівнянь руху
S.M.LaValle [8]	Planning Algorithms	Траєкторія описується як оптимальний шлях у конфігураційному просторі, що відповідає обмеженням системи керування
D. Mellinger, V. Kumar [9]	Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors	Траєкторія подається як параметрична крива, побудована на основі мінімізації ривка з урахуванням динаміки літального апарата
В.Г. Шерстюк, Р.М. Левківський, В.М. Гусев [6,7]	Динамічне планування траєкторій БПЛА	Траєкторія – як гібридна модель, що поєднує аналітичне передбачення маршруту з адаптивною реакцією на зовнішні зміни
А.Л. Загора, В.В. Сазонов [3]	Оптимізація траєкторій мобільних роботів	Траєкторія формується як рішення задачі багатокритеріальної оптимізації у середовищі з перешкодами

У класичному підході, що базується на механіці, одним із провідних авторів вважається P. Zarchan [10], який у своїй праці Tactical and Strategic Missile Guidance підкреслює значення траєкторії як результату розв'язання рівнянь руху об'єкта під дією аеродинамічних, гравітаційних і керувальних сил. У його підході траєкторія – це математична проекція фізичного руху, що визначається як функція часу для координат у просторовій системі.

З позицій теорії керування важливий внесок зробили S. M. LaValle [8] у монографії Planning Algorithms, де траєкторія трактується як результат оптимального керування з урахуванням обмежень динаміки системи та середовища. У цьому підході траєкторія визначається як безперервна функція, що з'єднує початкову та кінцеву точки в конфігураційному просторі, яка задовольняє умови досяжності та динамічної реалізованості.

В українських дослідженнях поняття «траєкторія руху» аналізується у працях В. Г. Шерстюка, Р. М. Левківського та В. М. Гусева [6, 7], які у своїх роботах акцентують увагу на безпечному та реактивному

плануванні руху безпілотних апаратів в умовах змінного середовища. Автори пропонують розглядати траєкторію як результат поєднання аналітичного планування та адаптивної корекції в реальному часі, що дозволяє підвищити гнучкість при виконанні місій в урбанізованому або загрозовому середовищі.

Застосування штучного інтелекту до генерації траєкторій також обумовлює нові трактування. Наприклад, Mellinger і Kumar [9] у контексті квадрокоптерів пропонують визначати траєкторію як множину параметричних кривих, згенерованих із врахуванням умов плавності, мінімізації ривка (jerk) і фізичних обмежень апарата. Такий підхід формалізує траєкторію як об'єкт оптимізаційного процесу, де цільова функція включає множину критеріїв керуваності.

Таким чином, аналіз літератури свідчить про те, що термін «траєкторія руху» має міждисциплінарну природу: у механіці польоту він відображає фізичну реалізацію руху; в теорії керування – динамічно допустимий зв'язок між станами; у штучному інтелекті – результат оптимізації в умовах багаточільових задач. Це зумовлює потребу у формуванні інтегрованого понятійного апарату для побудови універсальних моделей траєкторного планування.

Поняття «траєкторія руху» є фундаментальним у системах керування польотом атмосферних літальних апаратів. У попередньому розгляді траєкторія була охарактеризована як безперервний просторово-часовий шлях, який формується під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів і описується у рамках механіко-математичних або кібернетичних моделей. Проте для повноцінного функціонування навігаційно-керуючих систем цього визначення недостатньо, оскільки траєкторія руху не є ізольованою сутністю. Вона реалізується як результат поєднання двох взаємозалежних елементів – маршруту та навігації, кожен з яких виконує окрему, але взаємодоповнюючу функцію у побудові й дотриманні бажаної траєкторії. Зокрема, маршрут формує стратегічну конфігурацію руху, що визначає основні орієнтири місії, тоді як навігація забезпечує тактичну адаптацію руху відповідно до змінних умов середовища та параметрів простору. Саме тому системний аналіз дефініцій цих понять у сучасній науковій літературі дозволяє глибше зрозуміти концептуальні основи формування траєкторій літальних апаратів. У наукових джерелах терміни «маршрут» і «навігація» розглядаються крізь призму міждисциплінарних підходів, зокрема в галузях робототехніки, аеронавігаційних систем, систем керування польотом і штучного інтелекту. У таблиці 2 представлено узагальнені авторські інтерпретації цих понять.

Таблиця 2

Порівняльний огляд ключових інтерпретацій понять «маршрут» і «навігація» у працях провідних дослідників

Автор	Назва публікації	Наукова інтерпретація поняття
LaValle S. M. [8]	Planning Algorithms	Маршрут трактується як конфігураційна послідовність точок, сформована до початку руху. Підхід ґрунтується на аналізі конфігураційного простору з урахуванням обмежень навколишнього середовища.
Zarchan P. [10]	Tactical and Strategic Missile Guidance	Маршрут розглядається як логістично обґрунтований вектор руху, який включає повітряні коридори, зони підвищеного ризику та вплив погодних умов.
Mellinger D., Kumar V. [9]	Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors	Автори пропонують трактування маршруту як параметризованої функції, що оптимізується за критерієм мінімізації ривка з урахуванням динамічних обмежень літального апарата.
Авер'янова Ю., Рудякова А., Яновський Ф.[1]	Оперативна корекція траєкторії повітряного судна..	Навігація описується як динамічний процес визначення положення, швидкості та орієнтації літального апарата у просторі з метою уточнення траєкторії руху.
Шерстюк В. Г., Левківський Р. М. та ін. [6,7]	Метод пошуку безпечних траєкторій руху БПЛА	Навігація подається як адаптивна система, що забезпечує перебудову маршруту на основі мультисенсорної інформації в режимі реального часу.
Mashkov O., Trysnyuk V. та ін. [5]	Новий підхід до синтезу відновлюючого керування..	Навігація трактується як інтегрований канал зворотного зв'язку, що забезпечує реактивне керування та прийняття рішень у змінному середовищі.

Опис досліджень, присвячених дефініціям понять «маршрут» та «навігація», у контексті управління рухом атмосферних літальних апаратів, виявляє змістовні відмінності між підходами інженерних, кібернетичних та навігаційних шкіл, що дозволяє простежити еволюцію термінів у міждисциплінарному полі.

Поняття «маршрут» традиційно використовується для опису заздалегідь визначеної або оптимізованої послідовності контрольних точок, які з'єднують початкове і кінцеве положення об'єкта.

У фундаментальних дослідженнях, таких як LaValle [8], маршрут розглядається як частина конфігураційного простору, що апіорно формується за допомогою алгоритмів пошуку шляху (наприклад, A^* або RRT) до моменту початку руху.

У працях Zarchan [10] маршрут пов'язується з місією польоту, яка включає логістику повітряного переміщення та обліковує повітряні коридори, зони ризику, метеоумови, що вимагає від системи керування підтримання не лише геометричної, а й операційної цілісності маршруту. У пізніших роботах, зокрема Mellinger & Kumar [9], маршрут стає частиною параметризації траєкторії, яка генерується через оптимізацію за гладкістю (snap, jerk) і динамічними обмеженнями. Таким чином, сучасна інтерпретація маршруту фокусується не лише на геометрії руху, а й на контексті середовища, в якому реалізується місія апарата.

Щодо дефініції «навігація», то в дослідженнях Аверянової [1] навігація визначається як процес динамічного визначення просторового положення та параметрів руху з метою подальшого формування або уточнення траєкторії. У сучасних роботах поняття навігації охоплює не лише вимірювання координат, але і синтез відповідей на їх зміну. Шерстюк та ін. [6, 7] пропонують розглядати навігацію в комплексі з адаптивною маршрутизацією, де навігаційні дані слугують вхідними сигналами для перебудови поточного маршруту. Автори наголошують на важливості мультисенсорного підходу (інерційні, супутникові, візуальні сенсори), що забезпечує підвищення точності в умовах високої динаміки та невизначеності.

Крім того, у роботах Mashkov [5] зазначається, що навігація виступає не лише засобом позиціонування, а й каналом адаптації у контексті реактивного управління. У межах цієї парадигми навігаційна система є інтегральним елементом механізму ухвалення рішень щодо актуального вибору поведінки літального апарата.

Отже, аналіз літератури демонструє, що маршрут вважається детермінованою основою місії, що генерується на основі стратегічних параметрів середовища, тоді як навігація – це процес безперервного відтворення актуального стану об'єкта у просторі, який забезпечує зворотний зв'язок для підтримання або корекції маршруту і траєкторії. Обидва поняття формують функціональне ядро для розробки автономних систем управління літальними апаратами.

З'ясування змістового наповнення понять «траєкторія», «маршрут» і «навігація» дозволяє перейти до наступного етапу дослідження – вивчення конкретних методів, які забезпечують побудову, уточнення й адаптацію траєкторій руху атмосферних літальних апаратів. У сучасній науково-прикладній практиці використовуються як класичні аналітичні моделі, так і алгоритми, що базуються на машинному навчанні. Їх ефективність залежить від умов застосування, доступу до даних, потужності обчислювальних систем та цілей польоту. В таблиці 3 подано порівняльну характеристику основних підходів.

Кінематичне моделювання використовує базові рівняння руху без урахування силових або стохастичних впливів. Такий підхід дозволяє швидко будувати статичні траєкторії у заздалегідь відомих умовах. Моделі цього типу підходять для задач, де середовище не змінюється або контроль над параметрами високий. Основним недоліком є те, що такі моделі не враховують зовнішніх перешкод, змін погодних умов або поведінкових адаптацій літального апарата.

Таблиця 3

Порівняльна таблиця методів оптимізації траєкторій

Метод	Тип підходу	Переваги	Обмеження
Кінематичне моделювання	Аналітичне	Простота, швидкість, низькі обчислювальні витрати	Відсутність адаптивності, слабка реакція на змінні умови
A^* , D^* , RRT	Графовий пошук	Гнучкість у складних середовищах, можливість динамічного оновлення	Висока складність при великій кількості вузлів, залежність від параметрів
Гradientні, генетичні, ройові алгоритми	Оптимізаційне	Пошук глобальних рішень, багатокритеріальність	Високі ресурси, можливість потрапляння у локальні мінімуми
Фільтр Калмана	Статистичне згладжування	Висока точність у трасуванні, об'єднання сенсорних даних	Вимоги до коректності моделей, чутливість до шумів
Нейромережі, RL, гібридні системи	Штучний інтелект	Самонавчання, реактивність, адаптація до середовища	Висока складність, потреба у даних, низька прозорість роботи

Алгоритми маршрутизації (A^* , D^* , RRT) базуються на поданні простору у вигляді графа або дерева, де вузли відповідають допустимим положенням, а ребра – можливим переходам між ними.

- A^* виконує евристичний пошук найкоротшого шляху з урахуванням вартості,
- D^* дозволяє оперативно змінювати шлях при зміні конфігурації простору,
- а RRT – ефективний у просторі з великою кількістю ступенів свободи. Переваги – гнучкість, масштабованість; обмеження – чутливість до параметрів та висока обчислювальна вартість при складній топології.

Гradientні методи (наприклад, метод найшвидшого спуску) добре підходять для задач з гладкою функцією вартості, однак схильні до попадання в локальні мінімуми. Генетичні алгоритми і ройові системи (наприклад, Particle Swarm Optimization) дають змогу знаходити рішення у складних або шумних просторах. Такі методи забезпечують багатокритеріальний підхід (безпека, енерговитрати, тривалість польоту), проте потребують складної настройки й великої кількості ітерацій (табл. 4).

Таблиця 4

Порівняльна характеристика методів планування траєкторій за ключовими критеріями

Метод	Точність	Швидкодія	Гнучкість до змін середовища	Обчислювальні ресурси
Кінематичне моделювання [10]	Висока	Висока	Низька	Низькі
A^* , D^* , RRT [8]	Середня	Середня/висока	Середня/висока	Середні
Гradientні, генетичні, ройові [3,6,7]	Середня	Низька/середня	Висока (особливо ройові)	Високі
Фільтр Калмана [2,4]	Висока	Висока	Середня	Середні
Нейромережі, RL, гібридні системи [5]	Висока (залежно від навчання)	Середня	Висока	Високі

Фільтр Калмана забезпечує оптимальну оцінку стану системи на основі неповної або зашумленої інформації від сенсорів. Його застосування є доцільним для трасування фактичної траєкторії з метою порівняння з заданою або для компенсації відхилень. Фільтр є ефективним у системах навігації, де можливе об'єднання даних з GPS, IMU та інших джерел. Недоліки пов'язані з припущенням про лінійність системи та нормальний розподіл шумів.

Сучасні підходи використовують нейромережі для прогнозування дій або вибору траєкторії за даними з сенсорів та середовища. Навчання з підкріпленням (reinforcement learning) дозволяє системі самостійно вдосконалювати поведінку в процесі експлуатації. Гібридні архітектури поєднують класичні моделі з AI-підходами, що забезпечує адаптивність, але вимагає значних обчислювальних ресурсів, великих обсягів навчальних даних і створює труднощі для сертифікації через «чорну скриньку» рішень.

З урахуванням розглянутих підходів до формування траєкторій руху атмосферних літальних апаратів доцільним є проведення порівняльного аналізу їхньої ефективності відповідно до визначених критеріїв. Такий аналіз дозволяє виявити сильні та слабкі сторони кожного з методів у контексті точності, швидкодії, адаптивності до змін середовища та вимог до обчислювальних ресурсів. Зіставлення зазначених характеристик створює підґрунтя для формулювання висновків щодо придатності окремих рішень до використання в умовах різної складності та динаміки зовнішнього середовища.

У точності домінують фільтри Калмана й аналітичні моделі, які дозволяють досягти високої узгодженості між заданими та фактичними траєкторіями. Водночас методи на основі штучного інтелекту (нейромережі, reinforcement learning) демонструють кращі результати в умовах нестандартних ситуацій, однак можуть поступатися у прогнозованості результатів.

Швидкодія забезпечується в основному простими моделями та алгоритмами маршрутизації (зокрема D^*), які дозволяють оперативно перебудовувати шлях за змінених умов. Проте при масштабуванні системи або при збільшенні розмірності конфігураційного простору ці алгоритми потребують суттєвої оптимізації.

Щодо гнучкості, то найкращі результати демонструють методи навчання з підкріпленням та гібридні архітектури, які здатні адаптуватися до динаміки середовища на основі досвіду або багатовисхідного зворотного зв'язку. Водночас класичні алгоритми (кінематичні, gradientні) є переважно статичними та не передбачають змін структури рішення без перезапуску моделі.

У частині обчислювальних ресурсів найменш вимогливими є аналітичні підходи, а найресурсомінішими – неймережеві та еволюційні алгоритми. Це особливо важливо для безпілотних платформ з обмеженими можливостями обробки даних на борту.

У реальних умовах існують низка ситуацій, які знижують ефективність траєкторного планування незалежно від обраної моделі:

Складні рельєфи та міські умови: методи графового пошуку (наприклад, A*) часто створюють неефективні маршрути через велику кількість вузлів і перешкод. Також нейронні мережі, навчені в однорідному середовищі, можуть давати хибні результати.

Змінна погода: кінематичні та аналітичні моделі не враховують погодних змін, що знижує безпеку польоту. RL-підходи можуть демонструвати реактивність, але потребують навчання на погодних сценаріях.

Багатофакторні ризики: коли одночасно змінюються кілька параметрів (наприклад, вітрові умови, втрата сигналу, конфліктні траєкторії інших апаратів), більшість традиційних алгоритмів не можуть дати оптимальне рішення без інтеграції додаткових даних або адаптивної перебудови.

Розвиток інтелектуальних систем керування атмосферними літальними апаратами потребує не лише використання існуючих методів, але й їх глибокої модернізації відповідно до вимог динамічного, багатофакторного середовища. На цьому етапі ключовими напрямками удосконалення виступають інтеграція адаптивних механізмів, використання інструментів штучного інтелекту нового покоління, а також впровадження мультикритеріальних стратегій оптимізації. Ці підходи дають змогу формувати більш гнучкі, енергоефективні й стійкі до невизначеності системи планування траєкторій.

Одним із перспективних напрямів удосконалення є включення до системи керування механізмів онлайн-адаптації на основі навчання в процесі експлуатації. Такі моделі здатні оновлювати параметри планування в реальному часі, враховуючи змінні умови польоту, збої в сенсорних даних або появу нових перешкод. Онлайн-навчання дозволяє системі накопичувати досвід і вдосконалювати траєкторні рішення з кожною новою місією, підвищуючи ефективність керування без потреби повного перепланування.

Новітні генеративні моделі, такі як GPT (Generative Pre-trained Transformers), diffusion models та інші, відкривають можливість не лише до прогнозування станів, а й до генерації потенційних траєкторій з урахуванням складних просторово-часових зв'язків. Ці моделі можуть застосовуватися для створення сценаріїв польоту в умовах невизначеності, адаптації до нових ситуацій, а також для синтезу альтернативних рішень при виникненні конфліктів між маршрутом і умовами середовища. Генеративні ШІ мають потенціал значно прискорити процес побудови траєкторії при збереженні її адаптивності та обґрунтованості.

Удосконалення планування вимагає переходу від одномірних цільових функцій до багатокритеріальних моделей, які враховують енергетичні витрати, ризики безпеки, часові обмеження та інші стратегічні параметри одночасно. Мультикритеріальна оптимізація дозволяє балансувати між потенційно суперечливими цілями: мінімізацією тривалості польоту, максимізацією енергоефективності та забезпеченням проходження через безпечні зони. У цьому контексті важливу роль відіграють методи зважування критеріїв, побудова множин Парето та використання еволюційних стратегій.

Здатність оперативно реагувати на зміни в навколишньому середовищі, обхід нових перешкод і динамічне переналаштування параметрів траєкторії становить основу реактивного планування. Такі системи комбінують прогнозування подій із постійним оновленням поточного маршруту без потреби у повному перебудовуванні всієї траєкторії. Реалізація реактивного планування вимагає використання високопродуктивних обчислювальних платформ та синхронізації з поточними навігаційними і сенсорними даними.

Оптимальним напрямом удосконалення є розроблення гібридної архітектури системи планування, яка поєднує аналітичні та інтелектуальні компоненти. Зокрема, класичні моделі можуть забезпечувати базову стабільність та логіку руху, тоді як модулі ШІ відповідатимуть за адаптацію, генерацію альтернативних рішень та стратегічне прогнозування. Така архітектура має включати три шари: базовий (кінематичне моделювання), адаптивний (реактивна перебудова маршруту) та когнітивний (прогнозно-оцінювальні рішення ШІ). Це забезпечить не лише гнучкість, але й підвищить надійність траєкторного планування в умовах динамічних, багатофакторних середовищ.

Висновки. У статті здійснено системний аналіз існуючих методів формування та оптимізації траєкторій руху атмосферних літальних апаратів із позицій їх точності, адаптивності, швидкодії та ресурсної ефективності. Показано, що жоден з підходів не є універсальним, а ефективність їх застосування залежить від конкретних умов середовища й цілей польоту. Встановлено, що перспективними напрямками удосконалення є інтеграція адаптивного навчання, впровадження генеративних моделей ШІ,

використання мультикритеріальної оптимізації та реактивного планування. Запропоновано концепцію гібридної архітектури траєкторного планування, яка поєднує класичні алгоритми з інструментами штучного інтелекту, що створює передумови для підвищення автономності, безпеки та енергоефективності сучасних літальних систем.

Список використаних джерел:

1. Авер'янова Ю., Рудякова А., Яновський Ф. Оперативна корекція траєкторій повітряних суден на основі інформації бортових метеорологічних радіолокаторів. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2020. № 85(4). С. 13–20. DOI: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.85.15133>.
2. Даник Ю., Мазур В., Балицький І. Методологічні основи безпечного руху безпілотних літальних апаратів в просторі з динамічними перешкодами. 36. наук. пр. *Нац. акад. Держ. прикордон. служби України. Серія: Військові та технічні науки*. 2021. № 82(1). С. 224–236. DOI: <https://doi.org/10.32453/3.v82i1.541>.
3. Загора А. Л., Сазонов В. В. Оптимізація траєкторії руху інтелектуальних мобільних роботів при дистанційному зондуванні земель лісового фонду. *Journal of Rocket-Space Technology*. 2021. № 29(4). С. 190–193. DOI: <https://doi.org/10.15421/452121>.
4. Кривоножко А. М., Толкаченко Є. А., Опенько П. В. Розробка методу визначення параметрів поступального й обертального руху оптичного джерела реєстрації безпілотного літального апарата. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2020. № 4(41). С. 79–85. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.41.09>.
5. Машков О., Триснюк В., Мамчур Ю., Жукаускас С., Нігородова С., Курило А. Новий підхід до синтезу відновлюючого керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2019. № 1(19). С. 69–77. DOI: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-1\(19\)-69-77](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-1(19)-69-77).
6. Шерстюк В. Г., Левківський Р. М., Гусєв В. М., Сокол І. В., Доровська І. О. Метод пошуку безпечних траєкторій руху безпілотних апаратів. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2021. № 76(1). С. 113–125. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.1.14>.
7. Шерстюк В., Сокол І., Гусєв В., Левківський Р. Динамічне планування траєкторій руху безпілотних апаратів в процесі виконання складних операцій. *Problems of Information Technologies*. 2020. № 27. С. 7–22. DOI: <https://doi.org/10.35546/2313-0687.2020.27.7-22>.
8. LaValle S. M. *Planning Algorithms*. Cambridge : Cambridge University Press, 2006. URL: <https://planning.cs.uiuc.edu>.
9. Mellinger D., Kumar V. Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2011. P. 2520–2525. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980409.
10. Zarchan P. *Tactical and Strategic Missile Guidance*. 6th ed. Reston : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012. 832 p. DOI: 10.2514/4.102400.