

Тягній Володимир Григорович (кандидат технічних наук, старший науковий співробітник)

<https://orcid.org/0009-0003-4900-4272>

Журід Володимир Іванович

<https://orcid.org/0000-0001-8265-3264>

Васін Ігор Іванович

<https://orcid.org/0000-0003-3932-1381>

Яковлєв Руслан Петрович

<https://orcid.org/0000-0002-3788-2583>

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, м. Кременчук, Україна

ПЛАНУВАННЯ ТА ВИКОНАННЯ ПОЛЬОТІВ БПЛА В УМОВАХ ЗМІННОГО ОПЕРАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА

Проведено комплексний аналіз сучасних наукових підходів до організації процесів планування та виконання польотів безпілотних літальних апаратів в умовах змінного операційного середовища. Особливу увагу приділено проблемі формалізації параметрів середовища, що зазнає постійних змін, зокрема метеорологічних, топографічних, радіоелектронних та інформаційно-комунікаційних факторів, які визначають рівень ризику, точність навігації та стабільність функціонування сенсорних і виконавчих підсистем. Запропоновано класифікацію змінних операційних умов за ступенем їх впливу на траєкторні характеристики польоту, що дозволяє формувати адаптивні моделі прийняття рішень. Сформульовано вимоги до побудови математичних моделей оцінки стану середовища у вигляді векторів стану, часових рядів і ймовірнісних описів, що дає змогу враховувати невизначеність під час виконання місій різного типу. Проаналізовано сучасні методи оптимізації маршрутів, які поєднують детерміновані алгоритми планування траєкторій з елементами стохастичної оптимізації. Обґрунтовано доцільність використання багатокритеріальних підходів, що забезпечують баланс між енергетичною ефективністю, часом виконання, безпекою польоту та якістю зібраної інформації. Розроблено узагальнену концепцію циклу адаптивного управління, що включає етапи попереднього планування, моніторингу середовища, корекції маршруту та оцінювання результатів виконання завдання. Показано, що застосування механізмів репланування на основі тригерних подій дозволяє своєчасно реагувати на зміни зовнішніх умов, мінімізуючи ризики втрати стійкості та відхилення від траєкторії. Розглянуто архітектурні рішення для реалізації системи управління польотом безпілотних апаратів, яка включає модулі прогнозування, оцінки обстановки, локальної оптимізації траєкторій та інтерфейсу взаємодії оператора з автоматизованою системою. Визначено принципи інтеграції інформаційних потоків, що надходять із сенсорних каналів, комунікаційних систем і блоків навігації, для забезпечення узгодженого функціонування програмних компонентів. Описано підходи до валідації та експериментальної перевірки ефективності запропонованих алгоритмів. Запропоновано систему метрик для кількісного оцінювання ефективності управління польотом, що включає показники точності позиціонування, швидкодії реагування, енергоспоживання, стабільності навігаційних рішень і рівня ризику виконання завдання. Показано, що впровадження адаптивних алгоритмів планування та управління підвищує надійність і стійкість систем безпілотних літальних апаратів у складних і динамічних умовах, сприяє зниженню впливу невизначеності середовища та забезпечує ефективне виконання польотних завдань у режимі реального часу.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, планування польоту, змінне операційне середовище, адаптивне управління, багатокритеріальна оптимізація, система підтримки прийняття рішень.

Вступ

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) визначає новий рівень автоматизації процесів спостереження, моніторингу, логістики та забезпечення надійної експлуатації аероплатформи [1-3], що суттєво розширює можливості їх застосування у військовій, цивільній та науково-технічній сферах. Ефективність виконання польотних завдань безпілотними системами значною мірою залежить від здатності адаптуватися до змін операційного середовища, у

якому постійно варіюються метеорологічні, радіоелектронні, інформаційні та топографічні умови [4-6]. В умовах підвищення складності сценаріїв використання, необхідності оперативного реагування та обмеженості обчислювальних і енергетичних ресурсів особливої важливості набувають питання планування траєкторій, оптимізації управління та підвищення надійності функціонування автономних систем [5, 7-9]. Саме тому дослідження проблеми планування та виконання польотів БПЛА у змінному операційному

середовищі є надзвичайно актуальним з наукового та практичного погляду.

Матеріали та методи

У сфері планування та виконання польотів БпЛА свідчить про зростаючу увагу до проблем адаптації систем управління до динамічних умов середовища та невизначеності зовнішніх впливів [1-9]. У працях останніх років простежується тенденція до розроблення інтелектуальних моделей прийняття рішень, що базуються на стохастичних процесах, методах машинного навчання та алгоритмах оптимізації маршрутів у режимі реального часу [4-6, 10-12]. Значна частина досліджень присвячена питанням підвищення точності навігації, стійкості каналів зв'язку, енергоефективності руху та підвищенню автономності систем за рахунок удосконалення сенсорних і виконавчих модулів [6, 13-15]. Особливу увагу приділено побудові архітектур багаторівневих систем управління польотом, у яких поєднуються функції прогнозування, моніторингу стану середовища, локальної оптимізації та прийняття рішень в умовах часткової інформаційної невизначеності [9, 16-18]. У той же час більшість досліджень зосереджена на окремих технічних аспектах, як то оптимізація траєкторій, уникнення перешкод та стабілізація польоту, без належного урахування комплексної взаємодії між рівнями планування, сенсорної обробки та прийняття рішень. Невирішеною частиною дослідження залишається розроблення інтегрованої методології планування польотів БпЛА, здатної забезпечити адаптивну оптимізацію місії у змінному операційному середовищі з урахуванням ресурсних, часових і інформаційних обмежень апаратно-програмної платформи.

Отже, метою дослідження є розроблення інтегрованої методології планування та виконання польотів БпЛА у змінному операційному середовищі, яка забезпечує адаптивну оптимізацію маршрутів і параметрів місії з урахуванням ресурсних, часових та інформаційних обмежень, а також підвищення стійкості систем управління до динамічних зовнішніх впливів і невизначеності середовища.

Результати

1. Постановка завдання автоматизації процедур планування та виконання польотів БпЛА

На початковому етапі дослідження мають бути визначені основні закономірності функціонування БпЛА у змінному операційному середовищі, де взаємодія технічних, природних та інформаційних факторів формує умови прийняття рішень і виконання місії. Актуальність цього напряму зумовлена необхідністю врахування динаміки зовнішніх впливів, що безпосередньо визначають траєкторію руху, точність навігації, стабільність каналів зв'язку та ефективність управління наявним ресурсом апаратно-програмної платформи під час польоту. Для забезпечення адекватного реагування системи управління на мінливі умови передбачається виконання послідовності аналітичних і моделювальних процедур, які

формують основу адаптивного планування [6, 10, 17], як то:

систематизація типів змін у середовищі та визначення їхніх основних характеристик, що впливають на поведінку БпЛА;

формалізація параметрів операційного простору з урахуванням часової мінливості та ймовірнісної природи зовнішніх факторів;

встановлення операційних вимог до виконання місії і критеріїв оцінки їх ефективності за комплексом технічних, часових і безпекових показників;

розроблення методів кількісного оцінювання ризиків і невизначеностей, пов'язаних із виконанням польотних завдань.

Сукупність зазначених складових створює методологічну основу для побудови моделей адаптивного управління польотами в умовах змінного середовища та підвищення загальної стійкості безпілотних систем до зовнішніх впливів. У межах дослідження побудовано узагальнену методологічну структуру (рис. 1), що відображає послідовність етапів адаптивного управління польотом БпЛА. Така схема забезпечує системний підхід до визначення взаємозв'язків між динамічними факторами середовища, цільовими показниками місії та функціями оцінювання результативності польоту.

Функціонування БпЛА у реальних умовах визначається сукупністю змінних зовнішніх факторів [4-6], які формують операційне середовище польоту. Ключова особливість полягає у стохастичному характері параметрів, що змінюються у просторі та часі, а також у багаторівневій взаємодії природних, технічних та інформаційних процесів. Відповідно до цього, моделювання поведінки БпЛА потребує побудови класифікації середовищних змін із подальшою формалізацією параметрів у межах єдиного аналітичного простору.

Узагальнення та формалізація основних типів змін операційного середовища надає можливість сформувати наступну класифікацію [4-6, 13]:

1. Метеорологічні зміни, які охоплюють варіації температури, вологості, тиску, сили та напрямку вітру, рівня освітленості й оптичної прозорості атмосфери. Ці параметри безпосередньо впливають на аеродинамічні характеристики апарата, точність стабілізації та якість даних, отриманих оптичними системами.

2. Динаміка цілей і об'єктів, що відображає непередбачувані зміни просторового положення, швидкості або поведінкових характеристик цілей спостереження, транспортних засобів чи потенційних загроз. Цей тип змін визначає необхідність адаптивного коригування траєкторії та оперативного перепланування маршруту.

3. Радіоелектронні перешкоди, пов'язані з роботою засобів зв'язку, навігації та передачі даних, що проявляються у вигляді шумів, заглушень, втрати пакету сигналів або спотворенні фазових характеристик. Їхній вплив обумовлює

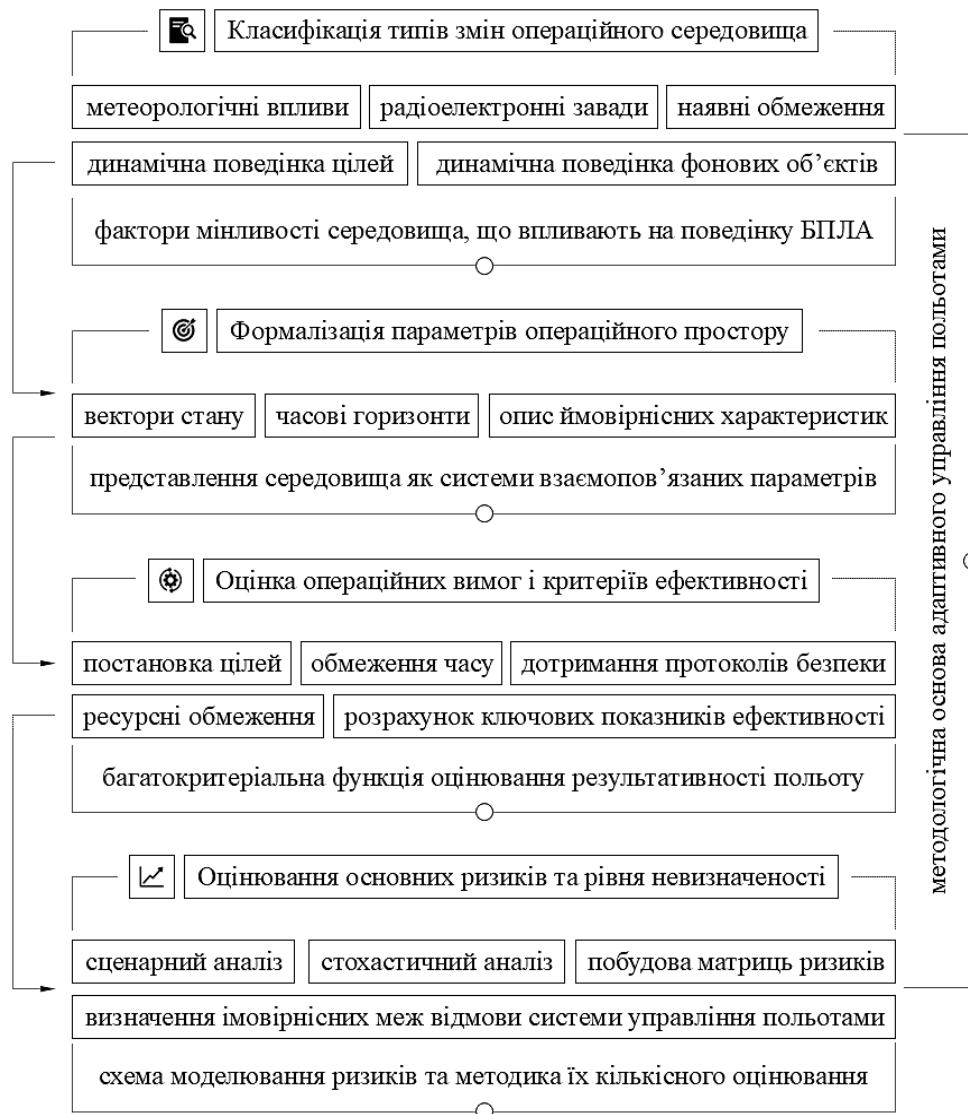


Рисунок 1 – Методологічна структура аналізу операційного середовища та ризиків адаптивного управління польотом БПЛА

потребу у використанні методів стійкої фільтрації, дублювання каналів і відновлення сигналу.

4. Обмеження повітряного простору, які включають геопросторові заборони, обмеження висоти, наявність зон заборони польотів або тимчасових коридорів, що вимагає врахування правових і регламентних аспектів під час формування траєкторії.

5. Логістичні обмеження, що стосуються доступності точок старту й посадки, зон заряджання або технічного обслуговування, запасу енергії, маси корисного навантаження й допустимого часу перебування в повітрі. Ці фактори визначають допустимі межі операційної гнучкості місії.

Для забезпечення можливості кількісного аналізу у рамках проведення дослідження було запропоновано формалізацію параметрів середовища у вигляді векторного опису стану системи

$$S(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)\},$$

де $x_n(t)$ – змінна, що описує один із параметрів середовища у момент часу t ;

$n \in [1; N]$ – кількість параметрів, що підлягають моніторингу.

Для кожного з них визначається часовий горизонт спостереження $T_n = [t_{\text{start}}^{(n)}, t_{\text{final}}^{(n)}]$, який характеризує інтервал актуальності значення параметра та функція невизначеності $U_n(t)$, що описує ступінь варіативності параметра в умовах стохастичних впливів. Ймовірнісна модель змін середовища може бути подана у вигляді функції розподілу щільності станів $P(S, t) = P(x_1, x_2, \dots, x_N, t)$, де $P(S, t)$ характеризує ймовірність появи певної конфігурації середовищних параметрів у заданий момент часу. Такий підхід забезпечує можливість побудови сценаріїв прогнозування поведінки системи, виявлення критичних комбінацій факторів і формування адаптивних стратегій реагування.

Розроблення ефективних стратегій планування

польотів БпЛА потребує чіткого визначення операційних вимог до місій, у межах яких задаються цілі, обмеження, критерії оцінювання та пріоритети їх досягнення. В умовах змінного операційного середовища система управління має не лише забезпечувати досягнення поставлених завдань, а й підтримувати стабільність функціонування при варіаціях зовнішніх факторів і внутрішніх параметрів. Таким чином, процес формування вимог і показників ефективності виступає проміжною ланкою між аналітичною моделлю середовища та алгоритмічним ядром системи адаптивного планування. Основними цілями польотних місій є забезпечення виконання завдань, пов'язаних із патрулюванням територій, веденням розвідки, спостереженням за об'єктами, доставкою вантажів або виконанням рятувальних операцій [1, 5-9]. Кожен із цих типів місій характеризується власним набором операційних параметрів, які визначають траєкторію руху, тривалість польоту, необхідну точність позиціонування та вимоги до стабільності каналів зв'язку. Для формалізації планування доцільно подати місію у вигляді цільової функції $J = f(G, C, R)$, де G відображає множину цілей, C – набір обмежень, R – систему критеріїв оцінювання результатів. Операційні обмеження визначають допустимі межі зміни параметрів системи і включають енергетичні, часові, просторові та безпекові фактори. Обмеження формують множину допустимих станів системи, яку можна виразити як $\Omega = \{S \in \mathbb{R}^N: g_n(S) \leq 0, n = 1, 2, \dots, N'\}$, де $g_n(S)$ – функції, що описують відповідні фізичні чи технічні обмеження. Для забезпечення об'єктивного оцінювання результатів місії визначається набір показників ефективності (KPI), які охоплюють технічні, часові та якісні характеристики виконання завдань. До найпоширеніших метрик, що пропонується включити у систему оцінки [9-12], належать:

коефіцієнт успішності місії K_{succ} , що визначається відношенням кількості досягнутих цілей до загальної кількості запланованих;

показник надійності системи K_{rel} , який враховує ймовірність безвідмовної роботи апаратури протягом усього польоту;

середній час виконання завдання T_{avg} , що відображає ефективність використання часових ресурсів;

рівень ризику R_{risk} , пов'язаний із відхиленнями від траєкторії або ймовірністю втрати сигналу зв'язку;

енергоефективність E_{eff} , що характеризує відношення виконаної корисної роботи до витрат енергії.

З огляду на багатовимірність завдань і взаємозалежність показників доцільно використовувати багатокритеріальний підхід до оптимізації, у межах якого кожен критерій має власну вагу w_i , що відображає його відносну значущість для даного типу місії. Таким чином, при побудові математичної моделі, узагальнена функція ефективності може бути подана у вигляді:

$$F_{eff} = \sum_{i=1}^k w_i \cdot K_i, \text{ причому } \sum_{i=1}^k w_i = 1, \quad (1)$$

де K_i – нормалізовані показники ефективності;

w_i – вагові коефіцієнти, визначені експертним або адаптивним методом.

Така модель дозволяє здійснювати пріоритезацію цілей і визначати оптимальні стратегії управління залежно від контексту місії.

В умовах змінного операційного середовища БпЛА діють у ситуаціях, де повна інформація про зовнішні умови або майбутні стани системи недоступна. Така невизначеність має як об'єктивний (випадковий), так і суб'єктивний (інформаційно-обмежений) характер і є одним із ключових чинників, що впливають на стабільність та безпечність виконання місій. Для її кількісного врахування в системах планування та управління необхідне побудування математичних моделей, які дозволяють прогнозувати можливі відхилення, оцінювати ризики виникнення несприятливих подій та визначати стратегії мінімізації їх наслідків. У контексті даного дослідження розглядаються три основні методи моделювання невизначеності [6, 12, 17], що утворюють основу адаптивного управління:

1. Стохастичні процеси, які описують поведінку змінних середовища як функцій часу з випадковими параметрами. До цього класу належать моделі типу Маркова, процеси Пуассона, стохастичне інтегрування Іто, що дозволяють будувати динамічні сценарії розвитку подій. Стохастична еволюція стану системи подається як $dS(t) = f(S, t) dt + g(S, t) dW(t)$, де $W(t)$ — вінерівський процес, що моделює випадкові збурення середовища.

2. Сценарний аналіз, який полягає у формуванні множини можливих сценаріїв розвитку подій із відповідними ймовірностями реалізації. Такий підхід дозволяє моделювати критичні ситуації та оцінювати поведінку системи за кожного з них.

3. Байєсівські підходи, у межах яких невизначеність розглядається як розподіл імовірностей щодо гіпотез або параметрів моделі. Байєсівська інференція забезпечує можливість послідовного оновлення оцінок стану системи у режимі реального часу за надходження нових даних, через визначення апостеріорної імовірності $P(\theta | D)$ параметра θ після спостереження даних D , що на математичному рівні формалізується рівнянням $P(\theta | D) = (P(D | \theta) \cdot P(\theta)) / P(D)$.

З метою інтеграції результатів моделювання невизначеностей у процес управління розробляються методи оцінювання ризиків, які дають змогу визначати критичні режими функціонування системи [9-13]. Найбільш поширеними інструментами є:

матриця ризиків, що відображає взаємозв'язок між імовірністю виникнення події та тяжкістю її наслідків. Для кожного сценарію визначається значення ризику $R = P_i \times L_i$, де P_i – імовірність

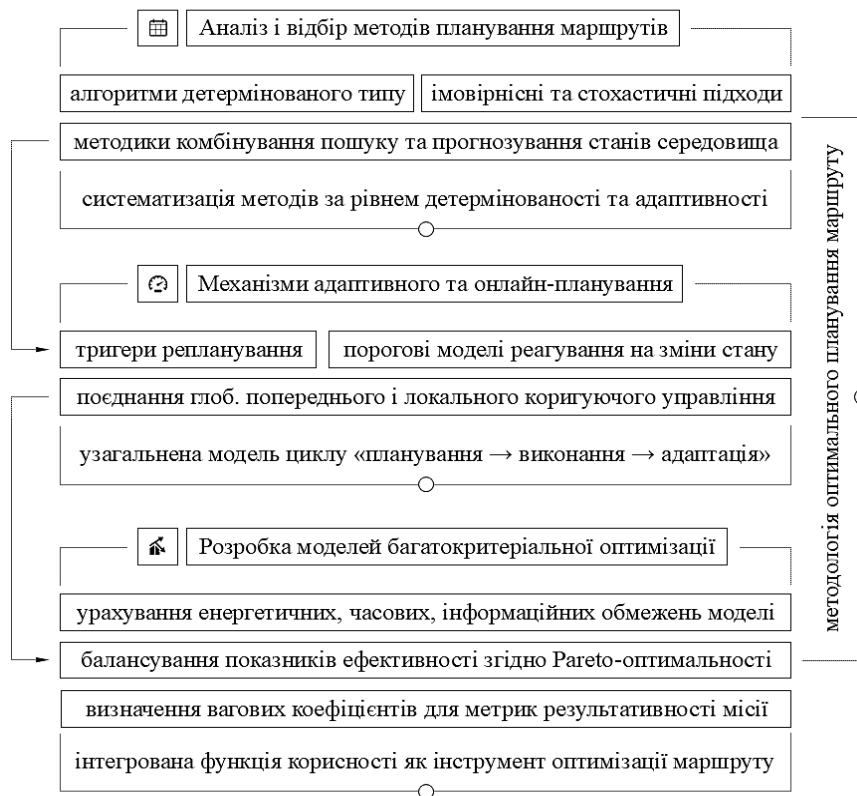


Рисунок 2 – Методологічна структура оптимального планування маршрутів БпЛА в адаптивному середовищі

реалізації події, L_t — рівень втрат або шкоди; імовірнісні межі відмов, що визначають порогові значення параметрів, за яких імовірність переходу системи у стан нестійкості перевищує допустимий рівень P_{lim} . Такий підхід дозволяє здійснювати моніторинг стану апарата та середовища з прогнозуванням моментів наближення до критичних режимів.

На основі зазначених методів формується схема процесу оцінки ризиків, яка включає такі етапи, як ідентифікація потенційних загроз і джерел невизначеності; кількісна оцінка імовірностей їх реалізації; визначення наслідків та рівня впливу на цілі місії; побудова матриці ризиків і встановлення порогів реагування; формування заходів адаптивного управління для зниження сукупного ризику. Для забезпечення відтворюваності аналізу доцільно використовувати мінімальний набір тестових сценаріїв, який охоплює типові ситуації: раптове погіршення погодних умов, переривання каналу зв'язку, збій навігаційних сенсорів, перевищення енергетичного ліміту та виникнення зовнішнього паразитного сигналу.

2. Комплексна методика планування й оптимізації маршрутів у змінних умовах

Після визначення характеристик змінного операційного середовища та побудови моделей невизначеностей наступним логічним кроком дослідження є формування ефективних методів планування траєкторій і оптимізації маршрутів БпЛА. Саме цей етап забезпечує практичну реалізацію аналітичних залежностей, що були отримані раніше, у вигляді алгоритмів, здатних приймати рішення у режимі реального часу. В

умовах динамічного середовища, де параметри системи та зовнішні впливи змінюються з високою частотою, особливою актуальністю набувають підходи, які поєднують точність математичного моделювання з гнучкістю адаптивного управління [7, 12, 17]. З метою досягнення цього передбачається послідовне виконання низки аналітичних та алгоритмічних процедур:

аналіз і відбір релевантних методів планування маршрутів із різним рівнем детермінованості, що дозволяють оцінити ефективність алгоритмів залежно від структури невизначеності;

розроблення механізмів адаптивного та онлайн-планування, орієнтованих на перерахунок траєкторії у випадку зміни стану середовища чи параметрів місії;

побудова моделей багатокритеріальної оптимізації, які враховують обмеження ресурсів, енергетичні й часові параметри, а також взаємозв'язки між показниками ефективності.

Сукупність цих складових створює теоретико-прикладну основу для розроблення систем автономного планування, що здатні забезпечити стійке та раціональне виконання польотів у непередбачуваних і змінних умовах експлуатації. На рис. 2 представлено методологічну структуру оптимального планування маршрутів БпЛА, яка охоплює три взаємопов'язані рівні: аналіз і класифікацію методів планування, механізми адаптивного та онлайн-планування, а також розробку моделей багатокритеріальної оптимізації.

Представлена на рис. 2 послідовність забезпечує реалізацію повного циклу “планування → виконання → адаптація”, що враховує

стохастичний характер змін середовища, ресурсні обмеження й критерії ефективності польотного завдання. Планування маршруту БпЛА є однією з центральних задач автономної навігації, що передбачає знаходження оптимальної або субоптимальної траєкторії руху в умовах обмежень і змінного середовища. На сьогоднішній день у науковій практиці сформувалися дві основні групи методів автоматичного планування маршруту: детерміновані та стохастичні, які відрізняються способом урахування невизначеності, складністю обчислень і гнучкістю реагування на зміни середовищних параметрів. Детерміновані алгоритми ґрунтуються на повній або частково відомій карті простору та використовують евристичні функції для пошуку найкоротшого або найменш затратного шляху. Їхньою перевагою є висока передбачуваність і гарантія знаходження оптимального рішення за відомих початкових умов, проте вони малоефективні у динамічних або частково спостережуваних середовищах. Для таких алгоритмів ключовими критеріями ефективності виступають час обчислення, точність рішення і стійкість до шуму у вхідних даних. На противагу цьому, стохастичні методи планування описують процес прийняття рішень у термінах імовірностей переходів між станами та очікуваної корисності дії. Такі підходи дозволяють враховувати невизначеність спостережень і випадковість змін середовища, формуючи гнучкі стратегії поведінки в реальному часі. Їхня ефективність визначається балансом між якістю рішення та обчислювальними витратами, що регулюється глибиною симуляцій і розміром простору станів. Вибір алгоритмічного підходу зумовлюється природою невизначеності: при статичному або квазістатичному середовищі доцільно застосовувати детерміновані методи з евристичним пошуком, тоді як у середовищах зі стохастичною динамікою перевагу мають імовірнісні або гібридні схеми, які дозволяють адаптивне репланування. Для об'єктивного порівняння алгоритмів у дослідженні надалі пропонується використовувати узагальнену схему оцінювання, що враховує три ключові показники: обчислювальну складність, ступінь адаптивності та ресурсні вимоги.

Виконання польоту в умовах змінного операційного середовища потребує від системи управління не лише здатності до попереднього планування, а й можливості динамічного коригування траєкторії у процесі руху БпЛА. Така властивість реалізується через механізми репланування, які забезпечують адаптацію маршруту у відповідь на непередбачувані зміни зовнішніх умов або внутрішніх параметрів системи. Репланування виступає ключовою складовою адаптивного управління, що дозволяє підтримувати ефективність і безпечність польоту при порушенні первинних припущень моделі середовища [7, 12, 17]. Основу такого підходу становлять тригери активації репланування, які поділяються на два основні типи:

подієво-орієнтовані тригери, що спрацьовують

у момент настання певної події, як то виявлення нової перешкоди, втрати зв'язку, зміни координат цілі або відхилення від запланованої траєкторії. Ці тригери забезпечують негайне перерахування маршруту й мінімізацію часу реакції системи;

порогово-орієнтовані тригери, які активуються після перевищення наперед заданого порогового значення контрольного параметра, як то рівня енергоспоживання, допустимого радіуса відхилення, температури або показника ризику. Такий підхід дає змогу уникати надмірних обчислень і підтримувати баланс між стабільністю та гнучкістю планування.

Ефективним напрямом розвитку систем репланування є створення гібридних схем, у межах яких поєднуються глобальне попереднє планування на стратегічному рівні та локальне адаптивне управління в межах поточного операційного простору [10, 12, 17]. Глобальний план визначає оптимальний маршрут і ключові контрольні точки місії, тоді як локальний рівень відповідає за корекцію траєкторії у відповідь на зміни навколишнього середовища. Такий підхід дозволяє забезпечити високу стійкість системи без надмірних витрат обчислювальних ресурсів, а також узгодженість між короткотерміновими рішеннями та загальною стратегією місії. Цикл адаптивного управління, таким чином, може бути формалізовано у вигляді послідовності дій “планування → виконання → моніторинг середовища → оновлення оцінки → репланування”, де кожен етап взаємодіє з попереднім і наступним через обмін даними про стан системи та середовища. Псевдокод цього циклу в узагальненому вигляді пропонується подати таким чином:

```
# Ініціалізація параметрів місії
initialize_mission(goals, constraints)
# Побудова первинного глобального маршруту
global_route =
plan_global_path(environment_model)
# Основний цикл виконання місії
while not mission_completed():
# Виконання поточної ділянки маршруту
execute_local_trajectory(global_route)
# Отримання актуального стану середовища
E_t = observe_environment()
# Перевірка умов для ре-планування
if trigger_event_detected(E_t) or
threshold_exceeded(E_t):
# Оновлення моделі середовища
environment_model =
update_environment_model(E_t)
# Перерахунок локальної ділянки маршруту
global_route =
replan_local_path(environment_model)
# Продовження виконання місії
continue_mission(global_route)
# Завершення місії та фіксація результатів
finalize_mission_report()
```

Застосування таких адаптивних циклів дозволяє мінімізувати ризики, пов'язані з невизначеністю середовища, забезпечити стабільність поведінки

безпілотної системи та досягти високої узгодженості між плануванням, виконанням і прийняттям рішень у режимі реального часу.

Одним із ключових аспектів планування маршрутів БпЛА є врахування ресурсних обмежень, що визначають реальні межі ефективності місії. З огляду на обмежений енергетичний потенціал, обчислювальні ресурси, пропускну здатність каналів зв'язку та фізичні характеристики корисного навантаження, система управління має забезпечити досягнення цілей із максимально можливою результативністю за наявності множини конкуруючих критеріїв. Ці фактори створюють багатовимірний простір прийняття рішень, у якому досягнення глобального оптимуму є недосяжним, що, у свою чергу зумовлює потребу у використанні багатокритеріальних методів оптимізації. Основними видами обмежень, що мають бути враховані при плануванні місії [5, 7, 13], є наступні категорії:

енергетичні обмеження, пов'язані з кінцевою ємністю джерел живлення, залежністю споживання енергії від швидкості, навантаження та режиму польоту. Енергетична модель описується функцією $E = f(v, m, t)$, де змінна v відображає показник швидкості, m – маса, t – час, а метою виконання процедури оптимізації є мінімізація сумарних витрат енергії за умови збереження досяжності цілі;

інформаційно-комунікаційні обмеження, які визначаються пропускну здатністю каналів зв'язку, рівнем завад та затримками передачі даних. Їхнє порушення призводить до втрати зворотного зв'язку або несвоєчасного оновлення моделі

середовища, що унеможливорює ефективне репланування.

фізичні та логістичні обмеження, до яких належать допустиме навантаження, габарити корисного вантажу, швидкісні межі, висотні профілі, а також часові рамки, у межах яких має бути виконано завдання.

Для пошуку компромісу між різними показниками ефективності застосовуються багатокритеріальні методи оптимізації [7, 10, 15], серед яких найпоширенішими є:

Pareto-оптимізація, яка дозволяє знайти множину недомінованих рішень, за яких покращення одного критерію неможливе без погіршення іншого;

метод вагових коефіцієнтів, у межах якого кожен критерій має власну вагу w_i , що визначається на підставі його відносної важливості, причому узагальнена цільова функція визначається як сума $w_n \cdot f_n(x)$ по $n \in [1; N]$, де $f_i(x)$ — нормалізовані функції критеріїв, x — вектор параметрів управління;

субоптимізаційні методи, які застосовуються для задач із великим простором станів або обмеженими обчислювальними ресурсами і дозволяють знаходити рішення, що наближено мінімізують цільову функцію при прийнятній точності й швидкості розрахунку.

Для практичної реалізації зазначених підходів доцільно формувати матрицю відповідності сценаріїв і методів оптимізації, яка може мати структуру, наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Відповідність сценаріїв місій, наявних обмежень і методів оптимізації маршрутів БпЛА [7, 10, 15]

Сценарій місії	Ключові обмеження	Динамічність середовища	Метод оптимізації	Критерій ефективності
доставка вантажу	енергетичні часові	низький рівень	вагові коефіцієнти	мінімізація споживання енергії
розвідувальна операція	комунікаційні безпекові	середній рівень	Pareto-оптимізація	максимізація точності спостереження
пошуково-рятувальна операція	енергетичні часові інформаційні	високий рівень	субоптимізація	мінімізація часу реагування
патрулювання (обмеж. зв'язок)	комунікаційні	середній рівень	гібрид. Pareto–вагова	підтримка стабільності зв'язку

Таке представлення дозволяє системно пов'язати умови експлуатації, доступні ресурси та вибір оптимізаційного інструментарію. Використання багатокритеріальних підходів у поєднанні з оцінкою обмежень забезпечує підвищення ефективності місій, збалансування енергетичних і часових витрат, а також підвищення стійкості системи до змін параметрів середовища.

3. Організація місії на основі архітектури управління з оцінюванням результатів

Після визначення методів планування та оптимізації маршрутів, має бути проведено

переведення дослідження у практичну площину, що, своєю чергою, включає у себе проведення організації процесу виконання місії та управління польотом у реальному середовищі. На цьому етапі визначальним є узгодження теоретичних моделей з архітектурою системи керування, забезпечення ефективної взаємодії її компонентів і формування механізмів прийняття рішень, здатних функціонувати в умовах динамічної невизначеності. Для досягнення цього надалі передбачається послідовне виконання наступного набору взаємопов'язаних завдань:

побудова архітектури управління польотом, що охоплює планувальні, аналітичні, комунікаційні та виконавчі модулі, а також встановлення принципів їх взаємодії;

розроблення стратегій ухвалення рішень у реальному часі з урахуванням рівня автономності системи та можливості втручання оператора;

проведення валідації й експериментальної перевірки ефективності запропонованих алгоритмів на основі симуляцій, стендових

випробувань і польотів у контрольованих умовах.

Сукупність цих складових формує завершений контур функціонування системи управління місією, що забезпечує підґрунтя для інтеграції адаптивних рішень у практичні сценарії використання БпЛА.

Рис. 3 ілюструє методологічну основу адаптивного управління польотами, що поєднує класифікацію змін операційного середовища, формалізацію параметрів операційного простору, оцінювання вимог ефективності та аналіз ризиків.

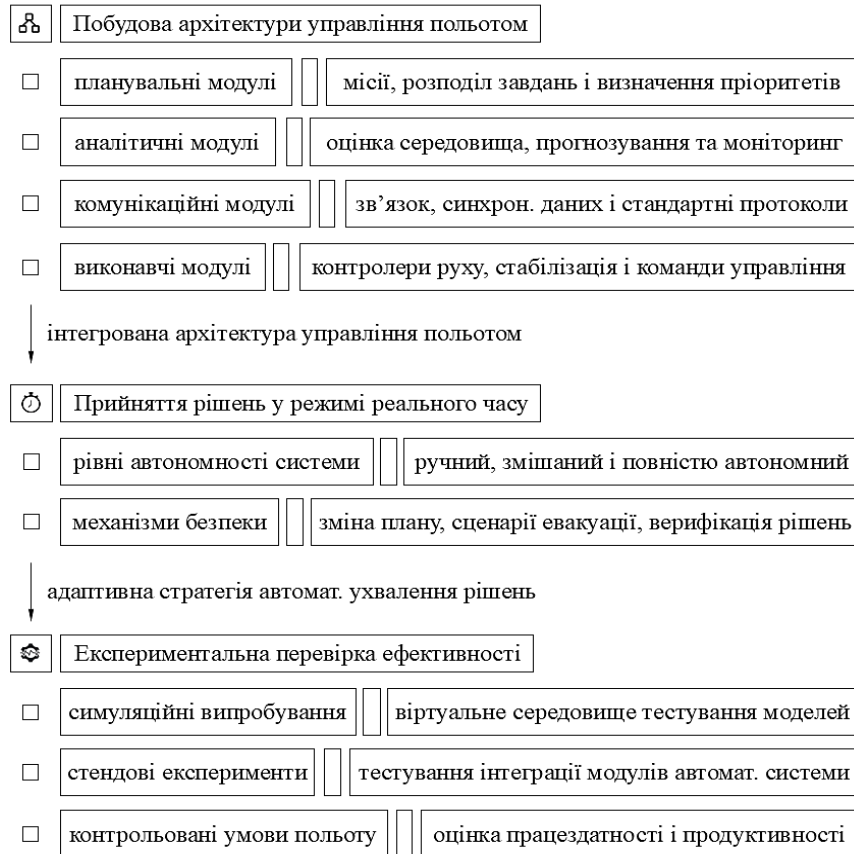


Рисунок 3 – Методологічна основа адаптивного управління польотами в умовах динамічного операційного середовища

Обговорення

Представлена структура окреслює взаємозв'язок між поведінковими факторами, стохастичними характеристиками середовища та критеріями результативності місії, формуючи базу для побудови моделей прогнозування, репланування й кількісної оцінки невизначеності.

Архітектура управління польотом БпЛА визначає структурну організацію функціональних модулів, що забезпечують виконання місії у режимі реального часу. Її побудова ґрунтується на принципах модульності, ієрархічності та інформаційної сумісності, що дозволяє забезпечити узгоджену взаємодію між рівнями планування, аналізу, керування й контролю [13, 16, 17]. Основу архітектури становить чотирирівнева система, до складу якої входять: планувальник місії, модуль оцінки середовища, контролер польоту та модуль зв'язку і прийняття рішень. Планувальник місії виконує стратегічні функції, як то формує траєкторію польоту, розподіляє завдання між

підсистемами, задає пріоритети цілей та забезпечує відповідність операційних параметрів встановленим обмеженням. Модуль оцінки середовища здійснює збір і синтез даних із сенсорів, прогнозує зміну зовнішніх умов та передає скориговані параметри до планувальника й контролера. Контролер польоту реалізує низькорівневе управління динамікою апарата, стабілізацію та корекцію руху відповідно до заданої траєкторії. Модуль зв'язку і прийняття рішень забезпечує двосторонню комунікацію між апаратом і наземним пунктом керування, здійснює обмін телеметричними даними та координує процес взаємодії між автономними підсистемами. Інформаційні потоки між компонентами мають бути організовані за принципом асинхронного обміну, що гарантує мінімальні затримки в передачі даних. Протоколи комунікації повинні підтримувати стандарти відкритої взаємодії, забезпечуючи інтеграцію різномірних апаратних і програмних рішень. Особливе значення мають

механізми синхронізації та верифікації даних, які гарантують узгодженість між вимірними й розрахунковими параметрами. Загалом така архітектура забезпечує реалізацію замкненого контуру управління, у межах якого кожен модуль виконує чітко визначену функцію, а система в цілому демонструє властивості адаптивності, відмовостійкості й масштабованості.

Процес ухвалення рішень у системах управління польотом БПЛА визначається необхідністю забезпечення безперервного функціонування в умовах динамічного середовища, обмежених ресурсів і потенційних відмов окремих підсистем. При цьому критично важливою є наявність адаптивного механізму, який дозволяє системі змінювати стратегію поведінки залежно від поточного контексту, одночасно зберігаючи контрольованість і прозорість дій для оператора. Сучасні архітектури управління передбачають ієрархію рівнів автономності, що охоплює діапазон від повністю ручного керування до автономного виконання місії без участі оператора. На нижчому рівні оператор контролює усі параметри польоту в режимі реального часу, тоді як на проміжних рівнях система виконує частину функцій автоматично (, залишаючи людині стратегічні рішення. На найвищому рівні автономності оператор виконує функції моніторингу та має право втручання у випадку позаштатної ситуації. Визначення точок втручання оператора базується на критеріях безпеки, таких як вихід параметрів за межі допустимих значень, втрата зв'язку, конфлікт між сенсорними даними або загроза зіткнення. Для підвищення надійності системи реалізуються механізми забезпечення надійності експлуатації аероплатформи [9, 13, 16], що передбачають:

відкат плану (Plan Rollback, PRB), що відповідає поверненню до останнього стабільного стану у разі виявлення помилки чи некоректного рішення;

евакуаційні сценарії (Emergency Fallback, EFB) як перехід до безпечного режиму польоту або повернення на базову точку у разі критичної відмови;

верифікацію рішень (Decision Verification, DV) як перевірку узгодженості між розрахунковими діями та поточними умовами, що запобігає виконанню помилкових команд.

Ключову роль у цьому процесі відіграє інтерфейс “людина-машина” (Human-Machine Interface, HMI), який забезпечує візуалізацію стану системи, параметрів середовища, прогнозів траєкторії та індикаторів ризику. Ефективний HMI має бути мінімалістичним, інформативним і контекстно чутливим, відображаючи лише релевантні дані для ухвалення рішення. До типових елементів інтерфейсу належать карта маршруту з актуальними ризиковими зонами, панель станів системи, повідомлення про події, прогноз часу до завершення місії та рівень залишкового ресурсу. Передача управління між системою й оператором здійснюється за формалізованими критеріями, серед яких рівень достовірності даних сенсорів, перевищення порогів ризику або втрачена

стабільність зворотного зв'язку. Такий підхід забезпечує баланс між автономністю системи та контролем з боку людини, що є ключовою умовою надійності і безпечності експлуатації безпілотних комплексів у реальному операційному середовищі.

Останнім етапом дослідження є валідація запропонованих алгоритмів і архітектур управління, що має на меті підтвердження їхньої працездатності, надійності та відповідності заданим критеріям ефективності [9-12, 16]. Перевірка здійснюється за допомогою багаторівневої експериментальної схеми, яка охоплює три послідовні етапи: моделювання, стендові випробування та польоти в контрольованих умовах. На етапі симуляцій створюються віртуальні середовища з різним ступенем невизначеності, у межах яких відтворюються типові сценарії місій. Це дозволяє дослідити поведінку системи при зміні метеоумов, параметрів зв'язку або структурних відмов компонентів. Стендові тести проводяться з метою перевірки апаратно-програмної інтеграції модулів, оцінки затримок у передачі даних і коректності взаємодії між підсистемами. Завершальний етап передбачає реальні польоти з поступовим ускладненням умов, що забезпечує перехід від теоретичної до практичної апробації результатів. Оцінювання результатів здійснюється на основі системи кількісних метрик ефективності, які відображають ключові характеристики функціонування безпіотної системи, що були розглянуті у першому розділі, а також коефіцієнт ефективності використання ресурсів ROI, як співвідношення між досягнутими результатами та витраченими ресурсами. Запропонована методологія забезпечує науково обґрунтовані засади для подальшого розвитку інтелектуальних систем автономного управління БПЛА.

Висновки

Дослідження присвячено проблемі планування, виконання та управління польотами БПЛА в умовах змінного операційного середовища. Основна увага приділена побудові інтегрованої методології адаптивного управління, яка враховує стохастичну природу зовнішніх впливів, ресурсні обмеження апаратно-програмної платформи та необхідність прийняття рішень у режимі реального часу. У результаті проведеного дослідження:

1. Узагальнено закономірності функціонування БПЛА у динамічному операційному середовищі, класифіковано типи змін та визначено їх вплив на стабільність польоту, точність навігації й ефективність виконання місій;

2. Розроблено математичні моделі оцінки стану середовища у вигляді векторів стану, часових рядів і ймовірнісних описів, що дозволяють кількісно враховувати невизначеність і будувати сценарії прогнозування поведінки системи;

3. Сформовано комплексну методику оптимального планування маршрутів, що включає класифікацію детермінованих і стохастичних алгоритмів, механізми онлайн-планування та репланування на основі тригерів, а також моделі

багатокритеріальної оптимізації з урахуванням енергетичних, часових і комунікаційних обмежень;

4. Обґрунтовано архітектуру системи управління місією, побудовану за принципами модульності й ієрархічності, яка поєднує рівні планування, оцінки середовища, управління динамікою та комунікаційної взаємодії, забезпечуючи узгодженість і відмовостійкість функціонування;

5. Розроблено підходи до валідації та експериментальної перевірки ефективності алгоритмів, що охоплюють моделювання, стендові випробування й контрольовані польоти; визначено систему метрик для кількісного оцінювання ефективності управління польотом.

Отримані результати мають суттєве практичне значення для підвищення надійності, автономності та енергоефективності безпілотних систем, які функціонують у складних і динамічних умовах. Запропонована методологія створює науково обґрунтовану основу для розроблення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень і впровадження адаптивних стратегій управління у процесі виконання місій різного типу.

Список використаних джерел

1. Jazairy, A., & Persson, M. (2024). Drones in last-mile delivery: A systematic literature review from a logistics management perspective. *The International Journal of Logistics Management*, 36(7). <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2023-0149>.
2. Kwakye, A. D., Jennions, I. K., & Ezhilarasu, C. M. (2024). Platform health management for aircraft maintenance – a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 238(3). <https://doi.org/10.1177/09544100231219736>.
3. Mendu, B., & Mbuli, N. (2025). State-of-the-Art Review on the Application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Power Line Inspections: Current Innovations, Trends, and Future Prospects. *Drones*, 9(4), 265. <https://doi.org/10.3390/drones9040265>.
4. Zhang, Z., Zhou, Y., Zhang, Y., & Qian, B. (2024). Strong Electromagnetic Interference and Protection in UAVs. *Electronics*, 13(2), 393. <https://doi.org/10.3390/electronics13020393>.
5. Gu, R., Zhao, Y., & Ren, X. (2025). Integrating wind field analysis in UAV path planning: Enhancing safety and energy efficiency for urban logistics. *Chinese Journal of Aeronautics*, 103605. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2025.103605>.
6. Jarraya, I., Al-Batati, A., Kadri, M. B., Abdelkader, M., Ammar, A., Boulila, W., & Koubaa, A. (2025). GNSS-denied unmanned aerial vehicle navigation: Analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies. *Satellite Navigation*, 6, 9. <https://satellite-navigation.springeropen.com/articles/10.1186/s43020-025-00162-z>.
7. Ahmed, G., & Sheltami, T. (2024). Novel energy-aware 3D UAV path planning and collision avoidance using receding horizon and optimization-based control. *Drones*, 8(11), 682. <https://doi.org/10.3390/drones8110682>.
8. Ahmed, G., Sheltami, T., & Shakshuki, E. (2024). Energy-efficient Internet of Drones path-planning study using meta-heuristic algorithms. *Applied Sciences*, 14(6), 2418. <https://doi.org/10.3390/app14062418>.
9. Jiang, Z., Song, T., Yang, B., & Song, G. (2024). Fault-tolerant control for multi-UAV exploration system via reinforcement learning algorithm. *Aerospace*, 11(5), 372. <https://doi.org/10.3390/aerospace11050372>.
10. Debnath, D., Vanegas, F., Sandino, J., Hawary, A. F., & Gonzalez, F. (2024). A review of UAV path-planning algorithms and obstacle avoidance methods for remote sensing applications. *Remote Sensing*, 16(21), 4019. <https://doi.org/10.3390/rs16214019>.
11. Huang, H., Li, Y., Song, G., & Gai, W. (2024). Deep reinforcement learning-driven UAV data collection path planning: A study on minimizing AoI. *Electronics*, 13(10), 1871. <https://doi.org/10.3390/electronics13101871>.
12. Garzelli, A., Benedikter, B., Zavoli, A., Martínez de Dios, J. R., Suarez, A., & Ollero, A. (2025). Stochastic path planning with obstacle avoidance for UAVs using covariance control. *Applied Sciences*, 15(19), 10469. <https://doi.org/10.3390/app151910469>.
13. Negru, S. A., Geragersian, P., Petrunin, I., & Guo, W. (2024). Resilient multi-sensor UAV navigation with a hybrid federated fusion architecture. *Sensors*, 24(3), 981. <https://doi.org/10.3390/s24030981>.
14. Ogunbunmi, S., Chen, Y., Blasch, E., & Chen, G. (2024). A survey on reputation systems for UAV networks. *Drones*, 8(6), 253. <https://doi.org/10.3390/drones8060253>.
15. Ahmed, G., Sheltami, T., Ghaleb, M., Hamdan, M., Mahmoud, A., & Yasar, A. (2024). Energy-efficient Internet of Drones path-planning study using meta-heuristic algorithms. *Applied Sciences*, 14(6), 2418. <https://doi.org/10.3390/app14062418>.
16. Hashim, H. A. (2025). Advances in UAV avionics systems architecture, classification and integration: A comprehensive review and future perspectives. *Results in Engineering*, 25, 103786. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103786>.
17. Wang, X.-F., Jiang, J., & Chen, W.-H. (2024). A hierarchical control framework for autonomous decision-making systems: Integrating HMDP and MPC. *arXiv preprint arXiv:2401.06833*. <https://arxiv.org/abs/2401.06833>.
- Chen, Z., Zhu, E., Guo, Z., Zhang, P., Liu, X., Wang, L., & Zhang, Y. (2025). Predictive autonomy for UAV remote sensing: A survey of video prediction. *Remote Sensing*, 17(20), 3423. <https://doi.org/10.3390/rs17203423>.

Volodymyr Malovanyi (candidate of technical sciences)

<https://orcid.org/0009-0003-4900-4272>

Volodymyr Zhurid

<https://orcid.org/0000-0001-8265-3264>

Igor Vasin

<https://orcid.org/0000-0002-8362-9036>

Ruslan Yakovliev

<https://orcid.org/0000-0002-3788-2583>

Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Kremenchuk, Ukraine

MISSION PLANNING AND EXECUTION OF UAV FLIGHTS IN A DYNAMIC OPERATIONAL ENVIRONMENT

A comprehensive analysis of current scientific approaches to the process of planning and executing unmanned aerial vehicle flights in a dynamic operational environment is undertaken. Particular attention is paid to the formalization of environmental parameters that undergo constant changes, including meteorological, topographic, electronic-jamming, and information-communication factors, which determine the level of risk, navigation accuracy, and stability of sensor and actuator subsystems. A classification of variable operational conditions by their impact on trajectory characteristics of flight is proposed, enabling the development of adaptive decision-making models. Requirements for constructing mathematical models to evaluate the state of the environment in the form of state vectors, time series, and probabilistic descriptions are formulated, allowing for uncertainty during the execution of various mission types to be taken into account. Modern methods of route optimization are analyzed, combining deterministic trajectory-planning algorithms with elements of stochastic optimization. The advisability of employing multi-criteria approaches is substantiated, ensuring a balance between energy efficiency, execution time, flight safety, and quality of collected information. A generalized concept of an adaptive control cycle is developed, including stages of pre-planning, environment monitoring, route correction, and evaluation of mission outcome. It is shown that the application of event-triggered replanning mechanisms allows for timely response to changes in external conditions, minimizing risks of instability and trajectory deviation. Architectural solutions for implementing a UAV flight-control system are examined, including modules for prediction, environment assessment, local trajectory optimization, and operator-system interaction interface. Principles for integration of information flows from sensor channels, communication systems, and navigation blocks to ensure coherent functioning of software components are defined. Approaches to validation and experimental verification of the proposed algorithms' effectiveness are described. A system of metrics for quantitative evaluation of flight-control effectiveness is proposed, including indicators of positioning accuracy, response speed, energy consumption, navigational-decision stability, and mission-execution risk level. It is demonstrated that the introduction of adaptive planning and control algorithms increases reliability and robustness of unmanned aerial systems in complex and dynamic conditions, reduces the influence of environmental uncertainty, and ensures effective execution of flight missions in real-time mode.

Key words: *unmanned aerial vehicle, flight planning, dynamic operational environment, adaptive control, multi-criteria optimization, decision-support system.*

References

1. Jazairy, A., & Persson, M. (2024). Drones in last-mile delivery: A systematic literature review from a logistics management perspective. *The International Journal of Logistics Management*, 36(7). <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2023-0149>.
2. Kwakye, A. D., Jennions, I. K., & Ezhilarasu, C. M. (2024). Platform health management for aircraft maintenance – a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 238(3). <https://doi.org/10.1177/09544100231219736>.
3. Mendu, B., & Mbuli, N. (2025). State-of-the-Art Review on the Application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Power Line Inspections: Current Innovations, Trends, and Future Prospects. *Drones*, 9(4), 265. <https://doi.org/10.3390/drones9040265>.
4. Zhang, Z., Zhou, Y., Zhang, Y., & Qian, B. (2024). Strong Electromagnetic Interference and Protection in UAVs. *Electronics*, 13(2), 393. <https://doi.org/10.3390/electronics13020393>.
5. Gu, R., Zhao, Y., & Ren, X. (2025). Integrating wind field analysis in UAV path planning: Enhancing safety and energy efficiency for urban logistics. *Chinese Journal of Aeronautics*, 103605. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2025.103605>.
6. Jarraya, I., Al-Batati, A., Kadri, M. B., Abdelkader, M., Ammar, A., Boulila, W., & Koubaa, A. (2025). GNSS-denied unmanned aerial vehicle navigation: Analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies. *Satellite Navigation*, 6, 9. <https://satellite-navigation.springeropen.com/articles/10.1186/s43020-025-00162-z>.
7. Ahmed, G., & Sheltami, T. (2024). Novel energy-aware 3D UAV path planning and collision avoidance using receding horizon and optimization-based control. *Drones*, 8(11), 682. <https://doi.org/10.3390/drones8110682>.
8. Ahmed, G., Sheltami, T., & Shakshuki, E. (2024). Energy-efficient Internet of Drones path-planning study using meta-heuristic algorithms. *Applied Sciences*, 14(6), 2418. <https://doi.org/10.3390/app14062418>.

9. Jiang, Z., Song, T., Yang, B., & Song, G. (2024). Fault-tolerant control for multi-UAV exploration system via reinforcement learning algorithm. *Aerospace*, 11(5), 372. <https://doi.org/10.3390/aerospace11050372>.
10. Debnath, D., Vanegas, F., Sandino, J., Hawary, A. F., & Gonzalez, F. (2024). A review of UAV path-planning algorithms and obstacle avoidance methods for remote sensing applications. *Remote Sensing*, 16(21), 4019. <https://doi.org/10.3390/rs16214019>.
11. Huang, H., Li, Y., Song, G., & Gai, W. (2024). Deep reinforcement learning-driven UAV data collection path planning: A study on minimizing AoI. *Electronics*, 13(10), 1871. <https://doi.org/10.3390/electronics13101871>.
12. Garzelli, A., Benedikter, B., Zavoli, A., Martínez de Dios, J. R., Suarez, A., & Ollero, A. (2025). Stochastic path planning with obstacle avoidance for UAVs using covariance control. *Applied Sciences*, 15(19), 10469. <https://doi.org/10.3390/app151910469>.
13. Negru, S. A., Geragersian, P., Petrunin, I., & Guo, W. (2024). Resilient multi-sensor UAV navigation with a hybrid federated fusion architecture. *Sensors*, 24(3), 981. <https://doi.org/10.3390/s24030981>.
14. Ogunbunmi, S., Chen, Y., Blasch, E., & Chen, G. (2024). A survey on reputation systems for UAV networks. *Drones*, 8(6), 253. <https://doi.org/10.3390/drones8060253>.
15. Ahmed, G., Sheltami, T., Ghaleb, M., Hamdan, M., Mahmoud, A., & Yasar, A. (2024). Energy-efficient Internet of Drones path-planning study using meta-heuristic algorithms. *Applied Sciences*, 14(6), 2418. <https://doi.org/10.3390/app14062418>.
16. Hashim, H. A. (2025). Advances in UAV avionics systems architecture, classification and integration: A comprehensive review and future perspectives. *Results in Engineering*, 25, 103786. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103786>.
17. Wang, X.-F., Jiang, J., & Chen, W.-H. (2024). A hierarchical control framework for autonomous decision-making systems: Integrating HMDP and MPC. *arXiv preprint arXiv:2401.06833*. <https://arxiv.org/abs/2401.06833>.
18. Chen, Z., Zhu, E., Guo, Z., Zhang, P., Liu, X., Wang, L., & Zhang, Y. (2025). Predictive autonomy for UAV remote sensing: A survey of video prediction. *Remote Sensing*, 17(20), 3423. <https://doi.org/10.3390/rs17203423>.