

**М. І. ПРОЦЕНКО**аспірант кафедри автоматизації  
та інтелектуальних інформаційних технологій  
Вінницький національний технічний університет  
ORCID: 0009-0003-7359-4874**Р. В. МАСЛІЙ**доцент кафедри автоматизації  
та інтелектуальних інформаційних технологій  
Вінницький національний технічний університет  
ORCID: 0000-0003-3021-4328

## ПІДХІД ДО ОПТИМІЗАЦІЇ СПОЖИВАННЯ ПАЛЬНОГО БПЛА

У статті запропоновано та теоретично обґрунтовано комплексний підхід до оптимізації споживання пального безпілотними літальними апаратами (БПЛА), який базується на інтеграції математичного моделювання енерговитрат, алгоритмічних методів оптимізації та аналізу траєкторій польоту у змінному середовищі. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення рівня автономності БПЛА шляхом раціонального використання обмежених енергоресурсів, що є критичним фактором для успішного виконання тривалих місій. Досліджено вплив конструктивних параметрів апарата, його аеродинамічних характеристик, маси корисного навантаження та мінливих зовнішніх факторів, таких як просторово-змінні вітрові навантаження, складний рельєф місцевості та наявність зон обмеженого доступу. Запропонована нелінійна багатокритеріальна модель дозволяє визначати енергетично оптимальні траєкторії та швидкісні режими польоту, що забезпечують мінімізацію витрат пального при збереженні необхідної точності виконання завдань і дотриманні заданих фізичних та просторових обмежень. Важливою особливістю розробленого підходу є використання принципу ковзного горизонту (Model Predictive Control – MPC), який забезпечує можливість оперативної адаптації траєкторії та режимів роботи БПЛА до змін навколишнього середовища в режимі реального часу. Також обґрунтовано доцільність використання висотного профілю маршруту як активного параметра керування для залучення енергетичного потенціалу атмосферних потоків. Проведене моделювання та аналіз свідчать, що впровадження розробленого підходу дозволяє знизити споживання пального на 10–25 % порівняно з традиційними методами планування, орієнтованими лише на мінімізацію часу або відстані. Практичне значення дослідження полягає у суттєвому підвищенні економічності та надійності функціонування БПЛА, що відкриває нові перспективи для їх ефективного застосування у військових, цивільних, аграрних та комерційних сферах.

**Ключові слова:** безпілотні літальні апарати, оптимізація споживання пального, енергоефективність, траєкторія польоту, алгоритми оптимізації, автономність БПЛА, динамічне середовище.

**М. І. PROTSENKO**Postgraduate Student at the Department of Automation  
and Intelligent Information Technologies Vinnytsia National Technical University  
ORCID: 0009-0003-7359-4874**R. V. MASLII**Associate Professor at the Department of Automation  
and Intelligent Information Technologies  
Vinnytsia National Technical University  
ORCID: 0000-0003-3021-4328

## AN APPROACH TO THE OPTIMIZATION OF FUEL CONSUMPTION IN UNMANNED AERIAL VEHICLES

The article proposes and theoretically substantiates a comprehensive approach to optimizing fuel consumption in unmanned aerial vehicles (UAVs), which is based on the integration of mathematical modeling of energy consumption, algorithmic optimization methods, and flight trajectory analysis in a dynamic environment. The relevance of the research is driven by the need to increase the autonomy level of UAVs through the rational use of limited energy resources, which is a critical factor for successful long-duration missions. The study investigates the influence of the vehicle's



structural parameters, aerodynamic characteristics, payload mass, and variable external factors such as spatially varying wind loads, complex terrain relief, and the presence of restricted access zones (no-fly zones). The proposed nonlinear multi-criteria model enables the determination of energy-optimal flight trajectories and speed modes that ensure the minimization of fuel consumption while maintaining the required mission accuracy and complying with specified physical and spatial constraints. A significant feature of the developed approach is the application of the receding horizon principle (Model Predictive Control – MPC), which provides the capability to adapt the UAV's trajectory and operational modes to environmental changes in real-time. Furthermore, the study justifies the feasibility of using the route's altitude profile as an active control parameter to harness the energy potential of atmospheric flows. Simulation and analysis indicate that the implementation of the developed approach allows for a reduction in fuel consumption by 10–25% compared to traditional planning methods focused solely on minimizing time or distance. The practical significance of the research lies in substantially enhancing the cost-effectiveness and reliability of UAV operations, opening new prospects for their efficient application in military, civil, agricultural, and commercial domains.

**Key words:** unmanned aerial vehicles, fuel consumption optimization, energy efficiency, flight trajectory, optimization algorithms, UAV autonomy, dynamic environment.

### Постановка проблеми

У період стрімкого розвитку технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) однією з головних перешкод підвищення ефективності їхнього функціонування залишається обмежений запас пального чи енергоресурсів. Такий фактор визначає тривалість перебування апарата у повітрі, відстань виконання місій і здатність систем здійснювати багаторівневі завдання в умовах змінного середовища. Попри активне вдосконалення конструкцій, підвищення ємності акумуляторів та використання більш економних двигунів, питання раціонального використання енергії зберігає свою актуальність, адже саме воно формує рівень автономності та функціональних можливостей БПЛА.

Інтерес наукової спільноти до цієї теми пояснюється необхідністю розроблення таких методів, що дозволяють враховувати взаємодію аеродинамічних, масових і зовнішніх параметрів апарата. Значна частина наявних моделей енергоспоживання базується на спрощених гіпотезах, через що їх використання в реальних умовах є обмеженим. Під час польоту істотну роль відіграють мінливі вітрові потоки, рельєф території, наявність зон із заборонаю польотів (no-fly zones) та потреба у швидкому коригуванні траєкторії. Отже, підвищення ефективності витрат пального становить не лише теоретичний інтерес, а й прикладну проблему, що вимагає універсальних і гнучких підходів.

З практичного погляду ця задача безпосередньо пов'язана з продуктивністю використання БПЛА у різних сферах. Для військових цілей ефективне витрачання пального визначає тривалість розвідувальних або бойових місій, здатність апарата здійснювати тривалі польоти та покривати значні відстані. У цивільному секторі – від аграрних моніторингових до логістичних операцій – енергоефективність впливає на економічні показники, стабільність маршрутів і екологічну доцільність експлуатації безпілотних систем. У наукових місіях і рятувальних операціях тривалість роботи апарата часто визначає можливість отримання необхідних даних або навіть порятунків життя.

Таким чином, проблема раціонального використання енергії БПЛА має як теоретичне, так і прикладне значення. Її розв'язання сприятиме створенню більш автономних, енергоощадних і надійних систем, здатних функціонувати стабільно навіть у складних та динамічних умовах.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

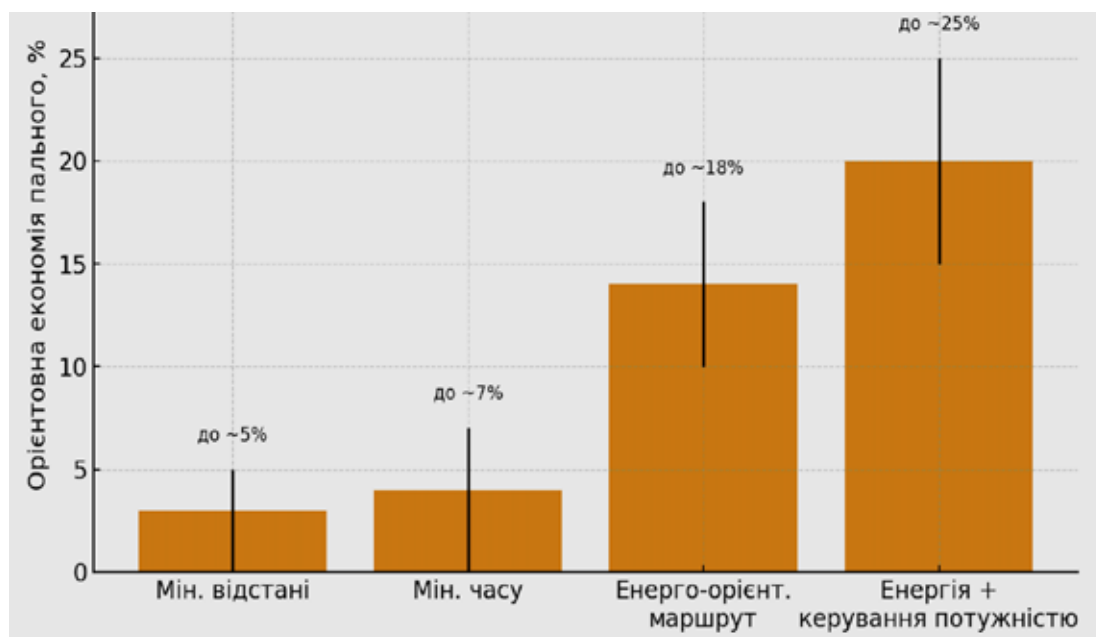
Проблема зменшення витрат пального безпілотними літальними апаратами (БПЛА) останніми роками активно розглядається у працях як українських, так і зарубіжних науковців. Вітчизняні дослідники зосереджують увагу переважно на побудові систем навігації та управління, акцентуючи важливість алгоритмічних підходів, які підвищують стабільність польоту та зменшують навантаження на операторів [1]. У цих роботах окреслено потенціал використання інтелектуальних методів планування, проте питання енергоефективності та економного споживання пального поки що залишається недостатньо опрацьованим.

На міжнародному рівні зростає інтерес до інтеграції методів пошуку найкращих рішень із моделями енергоспоживання. Зокрема, у роботі [2] показано, що застосування алгоритмів ройового інтелекту для формування траєкторій здатне істотно скоротити витрати пального без втрати точності виконання місій. Це підтверджує необхідність розглядати енергетичний критерій на рівні з традиційними показниками відстані чи часу. Водночас більшість відомих підходів мають певні обмеження – у багатьох випадках спрощено враховується вплив середовища: вітер розглядається як статичний фактор, рельєф місцевості та зони обмеженого доступу часто ігноруються. Окрім цього, чимало моделей не враховують зміну режимів польоту, хоча варіації швидкості та навантаження істотно впливають на витрати пального [3].

У роботі [4] зроблено спробу подолати ці недоліки шляхом використання модифікованого алгоритму ройового пошуку для багатодронових систем, у якому враховано енергетичні витрати разом із часовими обмеженнями. Це дало змогу досягти збалансованості між швидкістю виконання завдань і економією пального. Подібні підходи можуть бути адаптовані і для окремих БПЛА. У роботі [5] зазначено, що підвищення рівня автономності дронів

можливе лише за умови створення всебічних моделей, які відображають динаміку польоту, аеродинамічні параметри та вплив навколишнього середовища. Там же підкреслюється важливість поєднання методів керування маршрутом із реалістичними енергетичними моделями, здатними враховувати змінні умови.

Для узагальнення результатів різних досліджень на рис. 1 наведено порівняльну оцінку типових підходів до планування траєкторій за показником економії пального. Як видно, традиційні методи, що базуються лише на мінімізації відстані або часу, забезпечують відносно невелике зниження витрат (приблизно 3–5 %). Натомість енергоорієнтовані стратегії планування демонструють покращення на рівні 10–15 %, а інтегровані підходи, які поєднують управління маршрутом із регулюванням потужності, дозволяють досягати економії до 20–25 % [4, 5]. Це підтверджує доцільність розвитку узгоджених енергетичних моделей, спрямованих на підвищення ефективності польоту.



**Рис. 1. Порівняння підходів до планування траєкторії БПЛА за критерієм економії пального (узагальнено за результатами сучасних досліджень).**

Крім того, у роботі [6] доведено, що врахування енергетичних критеріїв під час розв'язання задачі покриття територій істотно підвищує автономність апаратів і зменшує сумарні витрати ресурсів у багатозонних місіях. Це підкреслює практичну важливість проблеми, оскільки навіть помірне скорочення споживання пального забезпечує помітний вииграш у тривалості місії. Окремо варто зазначити, що у дослідженні [7] продемонстровано перспективність поєднання планування маршруту з регулюванням режимів роботи двигуна для гібридних електричних БПЛА.

Отже, аналіз сучасних публікацій свідчить: попри суттєвий прогрес, наразі відсутній універсальний підхід, який би системно враховував увесь спектр факторів – від аеродинамічних властивостей апарата до впливу мінливого середовища та динамічних обмежень.

#### Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є створення та теоретичне обґрунтування всебічного підходу до підвищення ефективності використання пального безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Запропонована методика поєднує засоби математичного моделювання, алгоритмічні методи пошуку найкращих рішень і врахування впливу зовнішніх чинників середовища. Основна ідея полягає у формуванні енергоощадних траєкторій польоту, які сприяють зменшенню витрат пального без втрати точності виконання завдань і з дотриманням просторових обмежень, заданих місією.

Особливий акцент зроблено на здатності моделей адаптуватися до мінливих умов польоту, зокрема впливу вітрових потоків і наявності зон із заборонаю польотів. Це підвищує прикладне значення отриманих результатів як для військових потреб, так і для цивільних сфер застосування.

Очікується, що впровадження розробленого підходу дозволить знизити споживання пального приблизно на 10–25 %, що узгоджується з результатами попередніх закордонних досліджень у галузі енергоефективного планування траєкторій БПЛА [8].

### Викладення основного матеріалу дослідження

Оптимізація споживання пального БПЛА є складною багатофакторною задачею, що поєднує у собі питання аеродинаміки, енергетики, навігації та оптимізаційних алгоритмів. Традиційно маршрути польоту дронів будувались з урахуванням критеріїв мінімізації відстані чи часу. Однак численні дослідження свідчать, що ці критерії не завжди призводять до найменших витрат пального, оскільки ігнорують змінність режимів польоту, вплив вітру та конструктивні характеристики апарата [9]. Тому в сучасних підходах фокус зміщується на комплексне моделювання енергетичних витрат і пошук таких траєкторій, які дозволяють зменшити сумарне споживання ресурсів навіть за рахунок подовження шляху.

Для оцінки витрат пального на відрізок маршруту застосовується загальна енергетична модель:

$$F = SFC \cdot P_{req}(V_{air}) \cdot \frac{d}{V_{ground}} \quad (1)$$

де,  $SFC$  (Specific Fuel Consumption) – питома витрата пального,  $P_{req}(V_{air})$  – потужність, необхідна для підтримки заданої повітряної швидкості,  $d$  – довжина відрізка маршруту  $V_{ground}$  – швидкість відносно землі, яка формується як сума вектора власної швидкості апарата і вектора вітру. Ця формула є ключовою, адже дозволяє безпосередньо зв'язати параметри траєкторії з витратами пального.

Потужність  $P_{req}$  у спрощеному вигляді описується рівнянням:

$$P_{req}(V_{air}) = \alpha + \beta V_{air}^2 + \frac{\gamma}{V_{air}^2} \quad (2)$$

де параметри  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  відповідають за різні складові аеродинамічного опору: індуктивні втрати на малих швидкостях, паразитний опір на високих швидкостях та базові системні витрати. Така модель добре апроксимує реальні криві потужності малих і середніх безпілотних літальних апаратів [10]. Ключовим наслідком цієї залежності є наявність оптимальної швидкості  $V_{opt}$  при якій питомі витрати пального мінімальні. Це означає, що найекономічніший маршрут не завжди відповідає найкоротшій траєкторії: іноді вигідніше обрати довший шлях, який дозволяє рухатися у режимі близькому до  $V_{opt}$ , ніж скорочувати відстань за рахунок польоту в режимі, де витрати пального різко зростають.

На витрати пального значно впливають зовнішні умови. Якщо вітер є попутним, ефективна швидкість над землею зростає, час польоту скорочується і витрати пального зменшуються. У випадку зустрічного вітру ситуація протилежна: дрон витрачає більше енергії, щоб подолати ту саму відстань [11]. Подібна залежність вимагає від алгоритмів оптимізації здатності враховувати просторово-змінні метеоумови. Ще одним важливим фактором є рельєф місцевості. У випадку польоту над пересіченою чи гірською територією додаткові витрати виникають через необхідність набору висоти. Це можна оцінити за формулою:

$$E_h = mg\Delta h \quad (3)$$

де  $m$  – маса апарата,  $g$  – прискорення вільного падіння, а  $\Delta h$  – зміна висоти. Включення цього параметра у модель дозволяє адекватно оцінити витрати пального на маршрутах зі складним рельєфом [12].

Формалізація задачі оптимізації у такій постановці дозволяє представити задачу як пошук маршруту  $R$ , що мінімізує сумарні витрати пального:

$$\min_R F(R) = \sum_{i=1}^n SFC \cdot P_{req}(V_i) \cdot \frac{d_i}{V_{ground,i}} \quad (4)$$

за умов:

- маршрут не повинен перетинати зони обмеженого доступу (no-fly zones),
- швидкість  $V_i$  на кожному сегменті має належати до допустимого діапазону  $[V_{min}, V_{max}]$
- сумарні витрати пального  $F(R)$  не перевищують доступний запас бака  $F_{max}$

Наша модель будується на основі поєднання аеродинамічних характеристик апарата з урахуванням змінного середовища польоту. Вона враховує як режими польоту (через функцію потужності  $P_{req}(V_{air})$ ) так і зовнішні фактори (вітер, рельєф). Таким чином, оптимізація не зводиться лише до геометрії маршруту, а включає багатофакторний простір параметрів. Змінними задачі виступають швидкість руху  $V_i$ , висота польоту  $h_i$ , напрямок руху (вектор курсу) та сегментація маршруту. Параметрами є маса апарата, запас пального, характеристики двигуна, карти вітрових полів і топографії.

Обмеження накладаються як фізичні ( $V_i \in [V_{min}, V_{max}]$ ,  $h_i \leq h_{max}$ ), так і просторові (заборонені зони), а також енергетичні ( $F(R) \leq F_{max}$ ). Додатково можуть враховуватись регуляторні обмеження – наприклад, висота польоту над населеними пунктами чи критичною інфраструктурою [13].

Задача оптимізації у такій постановці є нелінійною та багатокритеріальною. Функція потужності (2) має нелінійний характер: на малих швидкостях витрати зростають через індуктивні ефекти, на великих – через паразитний

опір. Це створює «енергетичну криву», яка має мінімум у точці оптимальної швидкості  $V_{opt}$ , що демонструє залежність необхідної потужності від швидкості. Мінімум кривої відповідає оптимальній швидкості, за якої досягається найменше споживання пального.

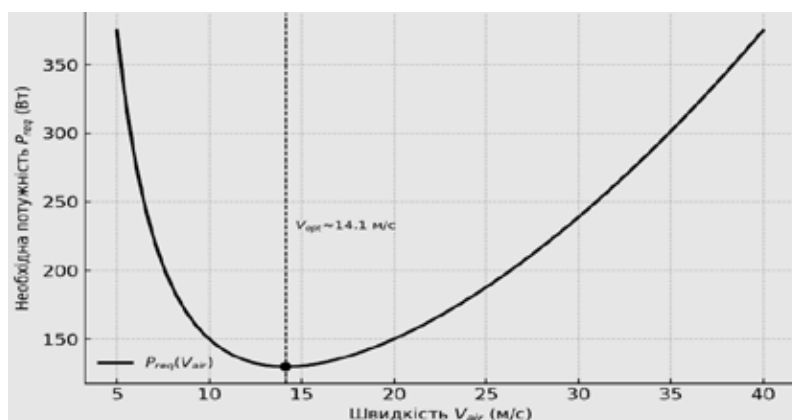


Рис. 2. Енергетична крива для БПЛА з позначеною оптимальною швидкістю  $V_{opt}$

Додатково складність посилюється стохастичними факторами – змінами вітрових умов у часі та просторі, які важко точно передбачити. Щоб зменшити обчислювальну складність, маршрут дискретизується на сегменти  $d_i$ , для кожного з яких окремо розраховуються витрати. Таким чином, глобальна оптимізація перетворюється на задачу пошуку найкращої комбінації сегментів у просторі станів. Це робить задачу придатною для вирішення методами ройової оптимізації, які добре працюють у великих просторах з нелінійними обмеженнями [14].

Варто зазначити, що процес підвищення ефективності траєкторного планування може мати різні цільові орієнтири залежно від завдання місії: мінімізацію споживання пального, скорочення часу виконання або максимізацію охоплення території. У межах цієї роботи основним показником обрано саме зменшення витрат пального. Водночас модель може бути розширена до багатофакторного формулювання із застосуванням вагових коефіцієнтів, що дозволяє зберігати гнучкість і пристосовуваність методики до конкретних умов застосування.

Окреме значення має підхід до повторного коригування маршруту у процесі польоту, який реалізується за принципом ковзного горизонту або Model Predictive Control (MPC). На відміну від традиційних схем, де траєкторія визначається повністю перед стартом і далі виконується без змін, MPC спирається на постійне оновлення рішення в реальному часі. Практична реалізація полягає у тому, що бортова система формує короткий прогноз траєкторії – зазвичай на інтервал від кількох десятків секунд до кількох хвилин, після чого виконує нові розрахунки з урахуванням актуальних сенсорних даних, зміни вітрової ситуації та залишку пального. Перевагою такого підходу є здатність системи оперативного пристосовуватись до змін навколишнього середовища. Якщо на маршруті з'являється сильний зустрічний потік або, навпаки, зона зі сприятливими вітрами, апарат одразу коригує швидкість, висоту або напрям руху. Це дає змогу уникати енергетично невідповідних режимів та ефективніше використовувати наявний запас пального. Крім того, MPC поєднує точність глобального планування з гнучкістю локальних рішень: загальний маршрут визначає основний напрям і просторові межі (наприклад, уникнення зон з обмеженнями на політ), тоді як локальні корекції забезпечують раціональне використання енергії у змінних умовах [16].

Застосування механізмів повторного обчислення траєкторії у режимі реального часу відкриває перспективу інтеграції з атмосферними прогнозними моделями. Використання метеорологічних карт високої просторової роздільності або даних наземних станцій дозволяє враховувати локальні зміни швидкості та напрямку вітру, що підвищує ефективність вибору режимів польоту. Це особливо важливо для тривалих місій, під час яких погодні умови можуть істотно відрізнятись від попередніх прогнозів. У цьому контексті MPC виступає центральним інструментом реалізації принципу енергетично раціонального маршруту.

Не менш важливою складовою є управління профілем висоти. У спрощених моделях набір висоти часто розглядають як додаткове навантаження на силову установку, що закономірно призводить до збільшення споживання пального. Проте детальніший аналіз показує, що вертикальний профіль може бути використаний як активний параметр енергоощадного керування. Підйом на більшу висоту стає доцільним, якщо на цьому рівні присутні стійкі попутні потоки, здатні збільшити ефективну швидкість польоту відносно земної поверхні. У таких випадках додаткові витрати на набір висоти компенсуються поліпшенням аеродинамічних умов. Зниження висоти, своєю чергою, може бути вигідним у зонах зі значними зустрічними потоками. Перехід на нижчі рівні зменшує тягове навантаження двигуна, що дозволяє скоротити витрати пального навіть за умови подовження маршруту.

У місцевостях із складним рельєфом раціональний вибір висоти також дає змогу уникнути зайвих маневрів і додаткових енергетичних втрат, пов'язаних з обходом перешкод. Усе це свідчить, що висотний профіль маршруту є не допоміжним, а повноцінним параметром задачі підвищення ефективності польоту [17].

#### Висновки

У статті представлено всебічний підхід до підвищення ефективності використання пального безпілотними літальними апаратами, що поєднує аналітичні моделі енергоспоживання з сучасними алгоритмічними методами керування. Показано, що традиційні стратегії планування, орієнтовані лише на скорочення часу виконання або довжини маршруту, не забезпечують необхідного рівня паливної економії. Натомість урахування аеродинамічних властивостей апарата, характеристик повітряних потоків і особливостей рельєфу дає змогу формувати траєкторії, які сприяють значному зменшенню споживання пального навіть у разі збільшення загальної відстані польоту.

Розроблені алгоритмічні рішення базуються на застосуванні принципу ковзного горизонту (Model Predictive Control), який забезпечує повторне коригування траєкторії в режимі реального часу з урахуванням зміни зовнішніх умов, а також на використанні раціонального керування висотним профілем, що дозволяє залучати енергетичний потенціал атмосферних потоків. Крім того, запропоновано низку енергоощадних методів на рівні бортових систем керування, які узгоджують роботу двигуна з поточними аеродинамічними параметрами.

Комплексне застосування цих рішень забезпечує відчутне скорочення витрат пального, створюючи передумови для збільшення тривалості польоту, розширення робочого радіусу дії та зниження експлуатаційних витрат під час виконання місій. Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію розроблених підходів із системами штучного інтелекту, прогнозними атмосферними моделями та гібридними енергетичними установками БПЛА, що відкриє нові можливості для підвищення енергоефективності та автономності польоту.

#### Список використаної літератури

1. Новиков Д. В. Всебічний огляд методів навігації БПЛА на базі штучного інтелекту. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. № 3. С. 12–18. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.024074>
2. Roberge, V., Tarbouchi, M., Labonté, G. Minimizing Fuel Consumption for Surveillance Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*. 2024. <https://doi.org/10.3390/s24020408>
3. Вадіс Д., Аврутов В. Методи підвищення функціональної ефективності безпілотних літальних апаратів. *Математичні машини і системи*. 2024. № 4. С. 178–191. <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317891>
4. Qi, Y., Jiang, H., Huang, G., Yang, L., Wang, F. Multi-UAV path planning considering multiple energy consumptions via an improved bee foraging learning particle swarm optimization algorithm. *Scientific Reports*. 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99001-z>
5. Amoiralis, E. I., Tsili, M. A., Spathopoulos, V., Hatziefremidis, A. Energy Efficiency Optimization in UAVs: A Review. *Applied Sciences*. 2021. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.792.281>
6. Ahmed, G., et al. Energy-Efficient Multi-UAV Multi-Region Coverage Path Planning. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09295-w>
7. Chen, Y., Zhao, X., Duan, H. An efficient energy management strategy of a hybrid electric UAV. *Aerospace Science and Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125837>
8. Ahmed, G.; Sheltami, T. Novel Energy-Aware 3D UAV Path Planning and Collision Avoidance Using Receding Horizon and Optimization-Based Control. *Drones*. 2024. Vol. 8, Issue 11. <https://doi.org/10.3390/drones8110682>
9. Ma Z., Chen J. An adaptive energy-efficient trajectory planning method for UAVs in complex environments. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 111. P. 103133. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103133>
10. Dorling, K., Heinrichs, J., Messier, G. G., Magierowski, S. Vehicle routing problems for drone delivery. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2017. 47(1), 70–85. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2016.2582745>
11. Shen Y., Zhu Y., Kang H., Sun X. UAV Path Planning Based on Multi-Stage Constraint Optimization. 2021. *Drones* 2021, 5(4), 144; <https://doi.org/10.3390/drones5040144>
12. Zeng, Y., Zhang, R., Lim, T. J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2016. 54(5), 36–42. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470933>
13. Tong, C., Liu, Z., Dang, Q., Wang, J., Cheng, Y. Online environmentally adaptive trajectory planning for rotorcraft unmanned aerial vehicles. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2023. 95(2), 312–322. <https://doi.org/10.1108/AEAT-02-2022-0059>
14. Huang, P.-q., Wang, Y., Wang, K.-z. Energy-efficient trajectory planning for a multi-UAV-assisted mobile edge computing system. *Frontiers in Information Technology & Electronic Engineering*. <https://doi.org/10.1631/FITEE.2000315>
15. Zhang, L., Celik, A., Dang, S., Shihada, B. Energy-Efficient Trajectory Optimization for UAV-Assisted IoT Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2021. <https://doi.org/10.1109/TMC.2021.3075083>

16. Rienecker H., Hildebrand V., Pfifer H. Energy optimal 3D flight path planning for unmanned aerial vehicle in urban environments. *CEAS Aeronautical Journal*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s13272-023-00666-x>

17. Li H., Jia R., Zheng Z., Li M. Energy-Efficient UAV Trajectory Design and Velocity Control for Visual Coverage of Terrestrial Regions. *Drones*. 2025. Vol. 9, No. 5. P. 339. <https://doi.org/10.3390/drones9050339>

### References

1. Novikov, D. V. (2020). Comprehensive review of UAV navigation methods based on artificial intelligence [in Ukrainian]. *Systems of Control, Navigation and Communication*, (3), 12–18. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.87.14842>

2. Roberge, V., Tarbouchi, M., & Labonté, G. (2024). Minimizing fuel consumption for surveillance unmanned aerial vehicles. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s24020408>

3. Vadis, D., & Avrutov, V. (2024). Methods for improving the functional efficiency of unmanned aerial vehicles. *Mathematical Machines and Systems*, (4), 178–191. <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317891>

4. Qi, Y., Jiang, H., Huang, G., Yang, L., & Wang, F. (2025). Multi-UAV path planning considering multiple energy consumptions via an improved bee foraging learning particle swarm optimization algorithm. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99001-z>

5. Amoiralis, E. I., Tsili, M. A., Spathopoulos, V., & Hatziefremidis, A. (2021). Energy efficiency optimization in UAVs: A review. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.792.281>

6. Ahmed, G., et al. (2024). Energy-efficient multi-UAV multi-region coverage path planning. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09295-w>

7. Chen, Y., Zhao, X., & Duan, H. (2025). An efficient energy management strategy of a hybrid electric UAV. *Aerospace Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2025.108765>

8. 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>

9. Ma, Z., & Chen, J. (2022). An adaptive energy-efficient trajectory planning method for UAVs in complex environments. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 111, 103133. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103133>

10. Dorling, K., Heinrichs, J., Messier, G. G., & Magierowski, S. (2017). Vehicle routing problems for drone delivery. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(1), 70–85. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2016.2582745>

11. Shen, Y., Zhu, Y., Kang, H., & Sun, X. (2021). UAV path planning based on multi-stage constraint optimization. *Drones*, 5(4), 144. <https://doi.org/10.3390/drones5040144>

12. Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 36–42. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470933>

13. Tong, C., Liu, Z., Dang, Q., Wang, J., & Cheng, Y. (2023). Online environmentally adaptive trajectory planning for rotorcraft unmanned aerial vehicles. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 95(2), 312–322. <https://doi.org/10.1108/AEAT-02-2022-0059>

14. Huang, P.-Q., Wang, Y., & Wang, K.-Z. (2020). Energy-efficient trajectory planning for a multi-UAV-assisted mobile edge computing system. *Frontiers in Information Technology & Electronic Engineering*. <https://doi.org/10.1631/FITEE.2000315>

15. Zhang, L., Celik, A., Dang, S., & Shihada, B. (2021). Energy-efficient trajectory optimization for UAV-assisted IoT networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. <https://doi.org/10.1109/TMC.2021.3075083>

16. Rienecker, H., Hildebrand, V., & Pfifer, H. (2023). Energy optimal 3D flight path planning for unmanned aerial vehicle in urban environments. *CEAS Aeronautical Journal*. <https://doi.org/10.1007/s13272-023-00666-x>

17. Li, H., Jia, R., Zheng, Z., & Li, M. (2025). Energy-efficient UAV trajectory design and velocity control for visual coverage of terrestrial regions. *Drones*, 9(5), 339. <https://doi.org/10.3390/drones9050339>

Дата першого надходження статті до видання: 21.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026