

А.Р. Кравчук, Ph.D., доц.
А.Г. Ткачук, к.т.н., доц.
О.О. Добржанський, к.т.н., доц.
Ю.В. Богоявленська, к.е.н., доц.
Д.Ю. Ткачук, асистент

Державний університет «Житомирська політехніка»

Аналіз методів автономної навігації БПЛА в умовах відсутності GPS-сигналу

У статті представлено систематизований огляд та порівняльний аналіз сучасних методів автономної навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах відсутності GPS-сигналу. Розглянуто основні методи автономної навігації: візуальні (оптичний потік, візуальна одометрія, візуальний SLAM), інерційні (на основі IMU), лідарні (LiDAR SLAM), радарні, радіочастотні (UWB, Wi-Fi, BLE), а також гібридні мультисенсорні системи. Особливу увагу приділено характеристикам навігаційних систем: точності позиціонування, затримці обробки, вимогам до обчислювальних ресурсів, надійності в різних умовах та рівню енергоспоживання. Розглянуто різні варіанти застосування для кожного методу, також визначено можливості використання з урахуванням технічних обмежень БПЛА. Наведено результати порівняльного аналізу, що дозволяє систематизувати переваги і недоліки окремих рішень залежно від типу середовища, обчислювального бюджету та цільової задачі. Окремо проаналізовано сучасні тенденції, а саме зростання ролі адаптивних систем із сенсорним злиттям та залучення методів машинного навчання.

Визначено основні виклики, що сповільнюють широке впровадження аналізованих систем у практичне застосування, а саме відсутність уніфікованих методик тестування, енергоспоживання складних систем, нестача реалістичних датасетів, проблема інтеграції алгоритмів у різні системи керування. Визначено перспективні напрями подальших досліджень, які включають розробку енергоефективних навігаційних рішень, інтеграцію глибокого навчання, створення спеціалізованого апаратного забезпечення. Отримані результати мають практичне значення для інженерів, розробників та дослідників, які працюють над підвищенням автономності БПЛА в умовах відсутності GPS.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; автономна навігація; автоматизовані системи керування.

Актуальність теми. Упродовж останнього десятиліття безпілотні літальні апарати (БПЛА), також відомі за більш поширеною назвою – дрони, набули значного покращення та стали невід’ємним інструментом для вирішення широкого спектра завдань – від цивільного моніторингу та логістики до високотехнологічних військових операцій. Згідно з даними аналітичної компанії «Drone Industry Insights», світовий ринок БПЛА демонструє щорічне зростання на рівні 13,8 % і, за прогнозами, досягне 43,1 млрд доларів до 2028 року [1].

Вказане вище зумовлено стрімким розвитком технологій, що призвів до створення доступніших, досконаліших і надійніших компонентів для дронів, зокрема систем керування та позиціонування в просторі. Більшість сучасних моделей використовують супутникові системи навігації як основний метод позиціонування, наприклад GPS. Однак існує багато ситуацій, коли сигнал GPS недоступний або ненадійний: у щільній міській забудові, всередині приміщень, у природних умовах (каньйони, печери, густі ліси) чи в умовах навмисного глушіння або спуфінгу сигналу.

Зростаюча потреба в надійній автономній навігації БПЛА без залежності від супутникових систем стимулює активний розвиток альтернативних методів локалізації й орієнтації в просторі. Проблематика набуває особливої актуальності у військовій сфері, де забезпечення стійкості до радіоелектронної протидії є критично важливим. Проте аналогічні завдання виникають і в цивільному секторі, де підвищення безпеки та надійності є ключовими пріоритетами.

Метою статті є виконання аналізу доцільності використання різних типів навігаційних систем на БПЛА в умовах відсутності GPS, а також визначення їх переваг, недоліків та особливостей застосування на практиці.

Викладення основного матеріалу.

Класифікація методів навігації без GPS. Методи автономної навігації безпілотних літальних апаратів за відсутності GPS класифікуються залежно від типу сенсорів і принципів обробки даних. Основними найбільш поширеними та перспективними методами навігації є візуальна навігація, інерційна навігація, лідарна та радарна навігація, радіочастотна навігація і комбіновані мультисенсорні системи (рис. 1).

Принцип дії *візуальної навігації* оснований на використанні деякої кількості камер для постійного аналізу навколишнього середовища й оцінки власного переміщення. До візуальних підходів належать такі методи: оптичний потік (аналіз зсуву пікселів між кадрами), візуальна одометрія (оцінка траєкторії за послідовностями зображень) та візуальний SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), який дозволяє одночасно будувати карту та визначати позицію в просторі.

Інерційна навігація працює завдяки інерційним вимірювальним блокам (Inertial Measurement Unit – IMU), які реєструють прискорення та кутові швидкості. Особливість цього методу забезпечує високу частоту оновлення даних і незалежність від зовнішніх умов, накопичення похибок (дрейф) обмежує його довготривале використання без додаткової корекції.

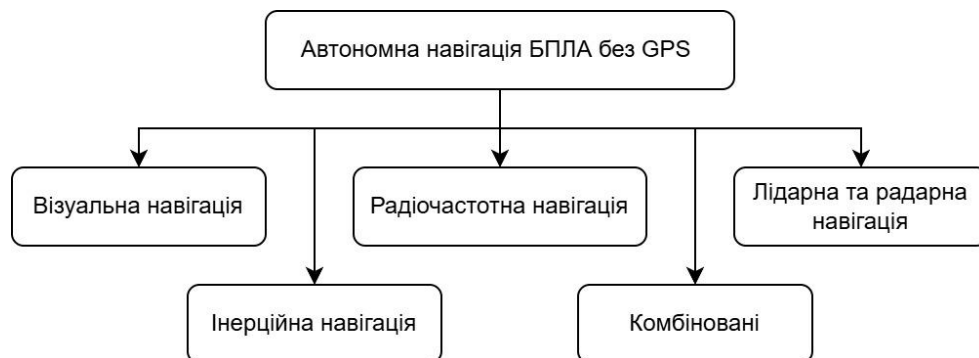


Рис. 1. Класифікація поширених методів автономної навігації, що не базуються на системах GPS

Використання *лідарної та радарної* навігації передбачає застосування активних датчиків. Лідар створює тривимірну карту середовища з високою точністю, завдяки якій можлива навігація. Радар своєю чергою працює в умовах обмеженої видимості (дощ, туман, дим) для визначення можливих перепон та об'єктів. Особливістю лідарних систем є можливість досягти високої точності до міліметрового рівня, а перевагою радарів є відносно висока надійність у складних погодних умовах.

Принцип роботи *радіочастотної навігації* оснований на використанні різних видів та потужності радіосигналів, залежно від сфери застосування БПЛА, для локалізації через методи триангуляції або вимірювання часу прибуття сигналу. Такі системи є ефективними в середовищах із розвинутою інфраструктурою, наприклад, у закритих приміщеннях або густій міській забудові, проте втрачають точність у місцевості, де недостатня кількість елементів системи радіолокаційного позиціонування, або на їх роботу впливає ландшафт чи інші чинники.

Комбіновані мультисенсорні системи інтегрують дані з різних сенсорів для компенсації слабких сторін окремих методів. Використання фільтрів Калмана (Extended Kalman Filter, Unscented Kalman Filter), часткових фільтрів (Particle Filter) або оптимізації фактор-графів дозволяє підвищити надійність та точність автономної навігації в різноманітних середовищах [2]. Таким чином, класифікація методів автономної навігації без GPS забезпечує основу для вибору відповідної технології залежно від умов експлуатації, обмежень за енергоспоживанням і вимог до точності позиціонування.

Як зазначалося вище, принцип роботи візуальної навігації полягає у використанні деякої кількості камер, які використовуються для аналізу навколишнього середовища та визначення відносного положення БПЛА у просторі. Основними поширеними підходами в межах цієї категорії є: оптичний потік (optical flow), візуальна одометрія (VO) та візуальний SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

Optical flow – це технологія аналізу переміщення пікселів між послідовними кадрами для визначення відносного руху фрейму. Алгоритми оптичного потоку, такі як Lucas-Kanade та Horn-Schunck, дозволяють визначати напрямок та швидкість руху без потреби у виділенні конкретних характеристик зображення [3]. Такі технологічні методи навігації часто використовуються для стабілізації висоти та уникнення перешкод, однак страждають від накопичення похибок при тривалому використанні.

Візуальна одометрія (VO) – техніка оцінки положення та орієнтації камери на основі аналізу послідовності зображень. Ця технологія передбачає виявлення добре видимих на зображенні орієнтирів для подальшого їх відстеження між послідовними кадрами, після чого виконується визначення різниць положення орієнтирів на кадрах, що дозволяє визначити напрямок руху. Зазвичай процес візуальної одометрії включає: виявлення особливих точок (feature detection), зіставлення точок між кадрами (feature matching), оцінку руху камери (motion estimation) та оптимізацію траєкторії (trajectory refinement), що є елементом керування рухом дрона. Особливістю вказаного є потреба у відносно потужних елементах керування, що підтримують алгоритми роботи технічного зору, також важлива якість вхідних зображень, за наявності шуму або інших видів перешкод, надійність роботи такої системи значно знижується. Відомі сучасні системи візуальної одометрії, такі як VINS-Mono [4] та ORB-SLAM3 [5], що демонструють високу точність у структурованих середовищах і вже знайшли застосування в комерційних дронах.

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) – це технологія алгоритмів, які дозволяють одночасно будувати мапу навколишнього середовища та локалізувати положення дрона на сформованій мапі. Порівняно з класичними методами візуальної одометрії, SLAM-системи підтримують особливі оптимізації та виявлення циклів (loop closure detection), що значно покращує точність позиціонування при тривалій навігації, тобто зменшує накопичену похибку. Поширені реалізації технології візуальної навігації SLAM включають варіанти LSD-SLAM, DSO, LDSO та ORB-SLAM2/3 [2].

Інерційні навігаційні системи (ІНС) зарекомендували себе одною з найпоширеніших технологій, що використовуються в авіації, зокрема і у сфері БПЛА. Інерційні вимірювальні пристрої складаються з акселерометрів, гіроскопів та іноді магнітометрів, що вимірюють прискорення та кутову швидкість об'єкта. Подвійне інтегрування даних акселерометра дозволяє оцінити переміщення, а інтегрування кутової швидкості – зміну орієнтації у просторі. Тобто положення визначається інтеграцією накопичених вимірювань швидкості та прискорення обертання. Перевагами інерційної навігації є: висока частота оновлення даних (до 1000 Гц), незалежність від зовнішніх умов (освітлення, погода) та відносно низькі вимоги до обчислювальних можливостей систем керування.

Проте ІНС мають недоліки та особливості. Серед яких накопичення похибок (дрейфу) отримуваних значень, що робить їх непридатними для тривалої автономної навігації без додаткових джерел інформації про положення в просторі. Також такі пристрої зазвичай мають відносно велику вагу (приблизно 30–50 кг, залежно від моделі та модифікації) для БПЛА середніх розмірів. Тому сучасні методи застосування в навігації включають комбінування ІНС з візуальними даними (Visual-Inertial Odometry, VIO тощо) для компенсації недоліків обох методів [6].

Lidar та Радарна навігація. Лідарні системи (LiDAR – Light Detection and Ranging) є високоточними сенсорними технологіями, принцип роботи яких оснований на використанні лазерного випромінювання для аналізу просторової структури навколишнього середовища. Принцип дії полягає у випромінюванні лазерного імпульсу, який відбивається від об'єктів, що трапляються на шляху, та повертається до сенсора. За допомогою точного вимірювання часу проходження імпульсу визначається відстань до кожного відбитого об'єкта. У результаті формується високоточна тривимірна мапа, так звана хмара точок (point cloud), яка відображає геометрію навколишнього середовища з великою деталізацією.

Однією з найважливіших переваг лідарної навігації є надзвичайно висока точність вимірювань. Це дозволяє використовувати дрони з лідарами за необхідності точного позиціонування. Наприклад, у складних або замкнених середовищах, таких як тунелі, лісисті ділянки, промислові об'єкти тощо. Лідари не залежать від освітлення, тому можливе їх ефективне застосування як удень, так і вночі, на відміну від візуальних систем. На практиці широко застосовуються алгоритми лідарної навігації, зокрема LOAM (Lidar Odometry and Mapping), який виконує одометрію в режимі реального часу та одночасно будує карту простору [7].

На відміну від лідарів, радарні системи (RADAR – Radio Detection and Ranging) використовують радіохвилі для визначення відстані до об'єктів. Радари випромінюють електромагнітні хвилі у радіочастотному діапазоні, які, так само як і лазерні імпульси, відбиваються від об'єктів і повертаються до приймача. Основною перевагою радарів є їхня висока надійність у несприятливих погодних умовах: вони ефективно працюють під час дощу, снігопаду, в умовах диму, пилу та густого туману, де оптичні системи можуть втрачати стабільність. Крім того, радары мають здатність проникати крізь деякі неметалеві перешкоди, а також можуть працювати на більших відстанях, що робить їх незамінними у завданнях виявлення об'єктів у розрідженому або відкритому середовищі.

Попри нижчу роздільну здатність порівняно з лідарними системами, радары демонструють велику стійкість до перешкод та відмінно доповнюють інші типи сенсорів. Зараз активно розвиваються алгоритми радарної SLAM-навігації (RadarSLAM) та радарної одометрії [8], які дозволяють автономним платформам, зокрема БПЛА, ефективно визначати положення у просторі та будувати мапи навіть у складних умовах із низькою або нульовою видимістю.

Радіочастотна навігація є ефективною альтернативою супутниковим технологіям позиціонування, особливо у середовищах із обмеженим або повністю відсутнім доступом до GPS. Цей підхід базується на аналізі параметрів радіосигналів для визначення просторового положення дронів відносно відомих джерел сигналу. Основна перевага радіочастотних методів полягає в їх здатності працювати в закритих приміщеннях, густій міській забудові або у випадках, коли GPS-сигнал зазнає глушіння чи спуфінгу.

Значного поширення набув Wi-Fi Positioning System (WPS), що використовує мережеві точки доступу Wi-Fi як орієнтири для триангуляції. Система аналізує рівень сигналу або час прибуття (ToA) сигналів від кількох точок доступу та обчислює приблизне місцезнаходження дрона. Така система демонструє прийнятну ефективність у міських умовах і в середині будівель, однак має низьку точність, яка зазвичай варіюється в межах 3–15 метрів. Попри це, простота реалізації і наявність великої кількості Wi-Fi-пристроїв робить цей підхід привабливим для деяких цивільних застосувань, особливо на малогабаритних дронах, які переміщаються в закритих приміщеннях.

Більш високоточним рішенням є технологія Ultra-Wideband (UWB), яка використовує широкосмугові короткоімпульсні сигнали у високочастотному діапазоні. Системи UWB зазвичай складаються з кількох стаціонарних маяків, що передають сигнали, та мобільного приймача на борту БПЛА. За допомогою методів триангуляції або трилатерації розраховується позиція дрона з точністю до 10 см [9]. UWB демонструє високу точність і стійкість до багатопроменевого поширення сигналу, що особливо важливо в умовах складної геометрії простору (наприклад, складські комплекси, фабрики, технопарки).

Ще одним варіантом є використання Bluetooth Low Energy (BLE) – технології, що дозволяє виконувати навігацію на основі бездротових маячків з низьким енергоспоживанням. BLE-системи працюють за принципом аналізу RSSI (Received Signal Strength Indicator) або часу прибуття сигналу (ToA). Цей підхід орієнтований на короткі відстані, але має перевагу в енергоефективності та дешевизні реалізації. BLE активно використовується для навігації в торговельних центрах, музеях, складах та інших закритих просторах, де потрібна помірна точність при низьких витратах ресурсів.

Комбіновані підходи на сьогоднішній день вважаються найбільш перспективними з погляду точності, надійності та стійкості до відмов окремих сенсорів. Їх суть полягає в одночасному використанні декількох типів сенсорів – візуальних, інерційних, радіочастотних, ультразвукових, лідарних тощо – та об'єднанні їх показників за допомогою математичних алгоритмів. Це дозволяє компенсувати недоліки кожного окремого джерела даних та досягти відносно високої точності в різноманітних умовах.

Ключовими алгоритмічними інструментами для реалізації мультисенсорної інтеграції є фільтри Калмана та їхні модифікації. Стандартний Kalman Filter (KF) ефективний для лінійних систем, тоді як Extended Kalman Filter (EKF) та Unscented Kalman Filter (UKF) застосовуються для нелінійних моделей і демонструють високу ефективність при обробці шумних і неповних даних [10]. У випадках, коли розподіл даних не є гаусовим або система має сильну нелінійність, використовуються Particle Filter (PF), які базуються на принципі важливого вибіркового моделювання. Ще одним сучасним підходом є оптимізація на основі фактор-графів (Factor Graph Optimization), яка забезпечує більш гнучке представлення залежностей між змінними та вимірюваннями, зберігаючи при цьому високу масштабованість і точність.

Прикладами ефективних мультисенсорних навігаційних систем є VINS-Fusion – алгоритм, що поєднує камери, IMU та (опціонально) GPS у єдину схему оптимізації для високоточної локалізації в режимі реального часу [11], а також ROVIO (Robust Visual Inertial Odometry) – візуально-інерційна система, орієнтована на використання в умовах обмежених обчислювальних ресурсів [12]. Обидві системи демонструють високу точність у складних середовищах і є активними об'єктами досліджень та розвитку в наукових і прикладних сферах. Для систематичного порівняння різних підходів до автономної навігації БПЛА проведено аналіз за ключовими параметрами, що визначають придатність технології до практичного застосування (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння методів автономної навігації БПЛА

Метод	Точність	Затримка	Обчислювальна складність	Умови роботи	Енергоспоживання
Оптичний потік	Низька (~5 % пройденого шляху)	Низька (< 10 мс)	Низька	Добре освітлене середовище	Низьке
Візуальна одометрія	Середня (~2 % пройденого шляху)	Середня (20–50 мс)	Помірна	Текстуроване середовище	Середнє
Візуальний SLAM	Висока (< 1 % пройденого шляху з loop closure)	Висока (50–200 мс)	Висока	Змінне, динамічне середовище	Високе
IMU	Низька (дрейф > 10 % за хвилину)	Дуже низька (< 5 мс)	Низька	Будь-яке	Дуже низьке
Lidar SLAM	Висока (< 0,5 % пройденого шляху)	Середня (30–100 мс)	Висока	Темрява, дим, без GPS	Високе
Radar SLAM	Середня (~2–3 % пройденого шляху)	Середня (30–80 мс)	Середня	Несприятливі погодні умови	Середнє
RF (Wi-Fi, UWB)	Середня (0,1–5 м)	Середня (20–100 мс)	Низька	Приміщення, зона покриття	Низьке
Sensor Fusion	Висока (< 0,5 % пройденого шляху)	Середня (залежить від конфігурації)	Висока	Універсальна	Високе

У таблиці 1 представлено порівняльний аналіз основних методів автономної навігації БПЛА за ключовими критеріями: точністю позиціонування, затримкою обробки даних, обчислювальною складністю, умовами ефективної роботи, надійністю в реальних середовищах та рівнем енергоспоживання.

Методи оптичного потоку є найпростішими з точки зору реалізації та обчислень, проте демонструють низьку точність (~5 % похибки) та середню надійність. Також такі системи мають обмежені можливості, надійність та точність в умовах недостатнього освітлення. Візуальна одометрія має дещо кращі показники точності та є ефективною в текстурованих середовищах, хоча вимагає помірних обчислювальних ресурсів.

Візуальний метод SLAM демонструє високу точність (до < 1 % похибки за рахунок замикання циклів), проте має найвищу затримку (до 200 мс) та потребує значних обчислювальних ресурсів. Аналогічно, Lidar SLAM забезпечує ще вищу точність (< 0,5 %) навіть у темряві чи при димі, але вимагає високих обчислювальних потужностей і споживає багато енергії.

Інерційна навігація характеризується найнижчими серед усіх аналізованих методів показниками затримки спрацювання, а також найнижчими показниками енергоспоживання. Головним недоліком таких систем є відносно швидке накопичення похибок через явище дрейфу, що обмежує її застосування як єдиної системи навігації. Радарна навігація показує стійкість роботи системи у несприятливих погодних умовах, а також має помірну точність позиціонування (~2–3 %) та середні вимоги до ресурсів.

Радіочастотні методи забезпечують дуже помірну точність (0,1–5 м), але ефективно працюють у приміщеннях або зонах із відповідною інфраструктурою, зберігаючи низький рівень енергоспоживання.

Найбільш універсальними виявляються комбіновані мультисенсорні системи (Sensor Fusion), які об'єднують дані з декількох джерел (візуальні, інерційні, лідарні, радіочастотні) за допомогою фільтрів Калмана, фактор-графів тощо. Такі системи досягають субвідсоткової точності в різних середовищах, проте вимагають складної інтеграції та мають високу обчислювальну вартість.

Результати порівняльного аналізу демонструють, що жодна з аналізованих технологій автономної навігації БПЛА не є універсальним рішенням, яке б ефективно працювало в усіх умовах експлуатації. Кожен метод має власні переваги, обмеження та оптимальні сфери застосування. Вибір конкретного підходу має здійснюватися з урахуванням специфіки завдання, навколишнього середовища, доступних апаратних ресурсів і допустимих похибок навігації.

У випадках використання малогабаритних дронів, що потребують швидкої реакції на зміну обстановки та виконання базових завдань стабілізації польоту і уникнення перешкод, найдоцільнішим є застосування оптичного потоку. Цей метод характеризується відносно низькими вимогами щодо обчислювальних можливостей, забезпечує достатню орієнтацію в добре освітлених середовищах і дозволяє підтримувати базову навігацію навіть на апаратах з обмеженим обчислювальним потенціалом.

Для завдань, де критичним є забезпечення високої точності локалізації протягом тривалого періоду часу, наприклад, під час картографування, інспекції інфраструктури або автономних польотів на значні відстані, оптимальним рішенням є мультисенсорні системи, зокрема ті, що включають компоненти SLAM. Вони дозволяють комбінувати дані з камер, ІНС, лідарів та інших сенсорів, досягаючи низької похибки в складних, динамічних умовах.

У несприятливих погодних умовах, таких як дощ, туман, сніг або дим, найбільш надійними виявляються радарні навігаційні системи. Завдяки використанню радіохвиль вони зберігають стабільність роботи в ситуаціях, коли оптичні сенсори стають непридатними або ненадійними. Радари демонструють високу стійкість до атмосферних і світлових перешкод, що робить їх незамінними у завданнях, пов'язаних з безпекою польотів у екстремальних умовах.

Для роботи в будівлях або закритих середовищах найбільш ефективними є системи, побудовані на базі технологій Ultra-Wideband (UWB) або візуальних підходів. UWB забезпечує високу точність позиціонування завдяки використанню короткоімпульсних сигналів та методів трилатерації, тоді як візуальні методи (зокрема візуальна одометрія та візуальний SLAM) дозволяють будувати карту простору і локалізуватися у приміщеннях із достатньою кількістю візуальних орієнтирів.

Загальною тенденцією останніх років є зростання популярності гібридних навігаційних систем. Такі системи динамічно адаптують набір сенсорів і алгоритми обчислень положення у просторі залежно від поточних умов середовища, вимог до точності та доступних ресурсів платформи. Такі адаптивні системи, що реалізують принципи контекстно-залежної сенсорної інтеграції, дозволяють значно підвищити гнучкість та надійність автономної навігації в широкому спектрі сценаріїв [13].

Аналіз представленого вище матеріалу вказує на низку викликів, що сповільнюють широке практичне застосування існуючих аналізованих технологій автономної навігації. Попри значний прогрес у розробці алгоритмів та сенсорних систем, багато рішень усе ще залишаються малоприсаєдними до реального впровадження у практичне застосування. Нижче представлено основні напрями, за якими доцільно зосередити майбутні наукові та прикладні дослідження.

Однією з головних проблем є обмежена надійність алгоритмів у реальних складних умовах експлуатації. Більшість сучасних навігаційних методів показують високу точність лише в лабораторних або контрольованих середовищах. За наявності динамічних об'єктів, зміни освітлення, вібрацій, диму,

запиленості або перешкод у візуальному полі сенсорів ці методи демонструють значне падіння продуктивності, точності та надійності роботи. Це особливо критично для застосування у військових або аварійно-рятувальних умовах, де зовнішні фактори можуть змінюватися непередбачувано.

Другою важливою проблемою є обмеження щодо енергоефективності. Сучасні високоточні сенсори (наприклад, лідари) та складні алгоритми обробки даних вимагають значних енергетичних ресурсів. Це суттєво знижує тривалість автономного польоту, особливо на мікро-БПЛА. Як продемонстровано на рисунку 2, різні типи сенсорів мають суттєво відмінні показники енергоспоживання, що змушує шукати баланс між точністю, надійністю та економністю використання ресурсів [14–19].

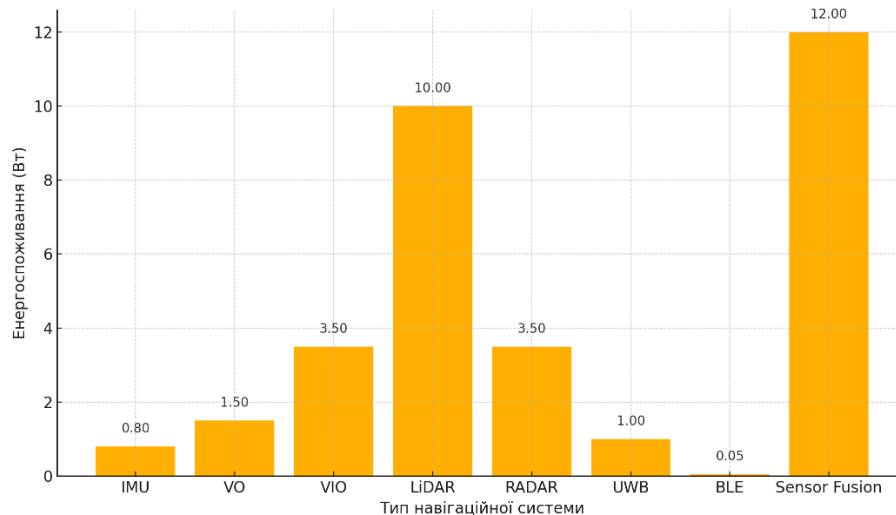


Рис. 2. Енергоспоживання різних навігаційних систем на малогабаритних БПЛА

Також існує проблема високої складності алгоритмів, особливо тих, що пов'язані з реалізацією SLAM або складної мультисенсорної інтеграції. На малогабаритних дронах, де ресурси обмежені, повноцінне виконання таких алгоритмів у реальному часі часто виявляється неможливим без спеціалізованого апаратного забезпечення. Крім того, масштабованість існуючих систем є ще одним викликом: багато рішень ефективні лише в обмежених середовищах. Під час переходу до великих відкритих територій або тривалих польотів ефективність систем падає, а накопичення помилок у системах призводить до втрати орієнтації. У науковій спільноті досі не сформовано уніфіковані протоколи оцінки продуктивності навігаційних систем. Різні дослідницькі групи використовують власні метрики, сценарії тестування та датасети, що ускладнює об'єктивне порівняння методів.

Ще однією проблемою є нестача реалістичних датасетів, які б відображали умови, наближені до незвичайних, нештатних та аварійних ситуацій. Більшість доступних наборів даних орієнтовані на ідеальні умови освітлення, відсутність завад, просту геометрію простору, що суттєво знижує їхню цінність для систем, що повинні працювати в реальному світі. Також гостро постає проблема переносимості алгоритмів (transferability): рішення, оптимізовані для конкретного середовища (наприклад, офісу або тунелю), часто не можуть бути використані в іншому контексті без суттєвої модифікації або повторного навчання системи.

На основі аналізу вказаного вище можливо окреслити низку перспективних напрямів досліджень, які мають потенціал суттєво змінити ситуацію та забезпечити новий рівень автономності БПЛА. Перш за все варто виокремити адаптивні мультисенсорні системи. Розробка навігаційних рішень, здатних динамічно змінювати конфігурацію та ваги сенсорів залежно від поточних умов середовища, освітлення, перешкод та рівня доступної енергії. Це дозволить оптимізувати споживання ресурсів і підвищити стійкість системи до відмов.

Також цікавим напрямом є інтеграція глибокого навчання нейромереж. Застосування нейромереж для виявлення та зіставлення особливих точок у візуальній одометрії, компенсації дрейфу ІНС семантичної сегментації сцени (наприклад, для фільтрації нерелевантних об'єктів) може суттєво підвищити адаптивність та інтелектуальні можливості систем.

Особливо перспективним напрямом вважається поєднання класичних геометричних підходів із методами машинного навчання, що дозволяє поєднати точність математично обґрунтованих моделей зі здатністю до адаптації й узагальнення, властивою нейронним мережам. Такі гібридні рішення мають потенціал стати основою наступного покоління навігаційних систем, що будуть придатними для використання у непередбачуваних і ворожих середовищах.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведений порівняльний аналіз методів автономної навігації БПЛА в умовах відсутності GPS-сигналу показав, що кожен підхід має свої переваги, недоліки та особливості застосування. На сьогодні не існує універсального однаково ефективного технічного

рішення для всіх сфер застосування. Оптичні та інерційні методи є простими та енергоефективними, але поступаються в точності, в той час як візуальні та лідарні SLAM-системи забезпечують високу точність, проте потребують значних обчислювальних ресурсів. Своєю чергою радарні технології виявляють високу надійність у складних погодних умовах, а UWB та BLE – ефективні у приміщеннях. Виконаний аналіз також показав, що значний потенціал мають мультисенсорні системи, які поєднують переваги окремих методів та забезпечують високу точність і стійкість до зовнішніх впливів. Водночас залишаються відкритими питання енергоефективності, масштабованості, стандартів тестування, адаптивності до нових умов. Зазначене вище є перспективними напрямками досліджень, що можуть бути спрямовані на створення гнучких, адаптивних навігаційних систем, що поєднують класичні алгоритми з методами машинного навчання для забезпечення автономності в складних та непередбачуваних середовищах.

References:

1. Drone Industry Insights (2023), *The Drone Market Report 2023–2028*, Berlin, [Online], available at: <https://droneii.com/product/drone-market-report>
2. Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H. et al. (2016), «Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age», *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 32, No. 6, pp. 1309–1332.
3. Baker, S. and Matthews, I. (2004), «Lucas-Kanade 20 Years On: A Unifying Framework», *International Journal of Computer Vision*, Vol. 56, No. 3, pp. 221–255.
4. Qin, T., Li, P. and Shen, S. (2018), «VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator», *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 34, No. 4, pp. 1004–1020.
5. Campos, C., Elvira, R., Rodríguez, J.J.G. et al. (2021), «ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial, and Multimap SLAM», *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 37, No. 6, pp. 1874–1890.
6. Forster, C., Carlone, L., Dellaert, F. and Scaramuzza, D. (2017), «On-Manifold Preintegration for Real-Time Visual-Inertial Odometry», *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 33, No. 1, pp. 1–21.
7. Zhang, J. and Singh, S. (2014), «LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time», *Robotics: Science and Systems*, Vol. 2, No. 9.
8. Hong, Z., Petillot, Y. and Lane, D. (2020), «Radar-based Navigation in Unknown Environments», *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 56, No. 6, pp. 4925–4941.
9. Tiemann, J. and Wietfeld, C. (2017), «Scalable and Precise Multi-UAV Indoor Navigation using TDOA-based UWB Tracking», *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1–7.
10. Bloesch, M., Burri, M., Omari, S. et al. (2017), «Iterated Extended Kalman Filter based Visual-Inertial Odometry using Direct Photometric Feedback», *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 36, No. 10, pp. 1053–1072.
11. Qin, T., Cao, S., Pan, J. and Shen, S., «A General Optimization-based Framework for Global Pose Estimation with Multiple Sensors», [Online], available at: <https://arxiv.org/abs/1901.03642>
12. Bloesch, M., Omari, S., Hutter, M. and Siegwart, R. (2015), «Robust Visual Inertial Odometry Using a Direct EKF-Based Approach», *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 298–304.
13. Paul, M.K., Wu, K., Hesch, J.A. et al. (2018), «A Comparative Analysis of Tightly-coupled Monocular, Binocular, and Stereo VINS», *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 165–172.
14. Delmerico, J. et al. (2021), «Are we ready for autonomous drone racing? The UZH-FPV drone racing dataset», *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, [Online], available at: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3511210>
15. Qin, T. et al. (2020), «VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator», *IEEE Transactions on Robotics*, [Online], available at: <https://arxiv.org/abs/1809.05780>
16. Lüthi, M. et al., «Energy-efficient LiDAR SLAM for Micro Aerial Vehicles», [Online], available at: <https://arxiv.org/abs/2309.14272>
17. Guerreiro, B. et al., «Radar-Inertial State Estimation for UAV Motion in Highly Agile Manoeuvres», [Online], available at: https://www.aau.at/wp-content/uploads/2022/08/Radar-Inertial_State-Estimation_for_UAV_Motion_in_Highly_Agile_Manoeuvres.pdf
18. Wu, L. et al., «An Ultra-Wideband and Inertial Sensor Fusion Approach for Indoor UAV Localization», [Online], available at: <https://arxiv.org/html/2504.14376v1>
19. Zhou, B. et al., «LiDAR, IMU and Camera Fusion for SLAM: A Systematic Review», [Online], available at: <https://www.researchgate.net/publication/389981824>

Кравчук Антон Романович – доктор філософії, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-8305-2492>.

Наукові інтереси:

- промислова та мобільна робототехніка;
- БПЛА;
- САД-системи та адитивні технології;
- вбудовані системи та автоматизовані системи управління.

Ткачук Андрій Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-2466-6299>.

Наукові інтереси:

- автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи;
- мобільні роботизовані платформи;
- системи стабілізації озброєння.

Добржанський Олександр Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-4330-0287>.

Наукові інтереси:

- автоматизоване управління виробничими процесами;
- гіроскопічні гравіметри;
- розробка програмного забезпечення для промислових та бізнес-процесів (C, C++, C#, VBA, JS/HTML/CSS, Python, Lua);
- програмування PLC та SCADA (LD, FBD, SFC, IL, ST);
- 3D-моделювання в технологіях Unity, VR;
- дистанційно керовані мобільні платформи.

Богоявленська Юлія Вячеславівна – кандидат економічних наук, доцент, докторант кафедри фінансів та цифрової економіки Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-4101-7127>.

Наукові інтереси:

- проєктний менеджмент;
- міжнародні проєкти;
- цифрова економіка;
- фінанси.

Ткачук Даниїла Юріївна – асистент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0003-2583-6445>.

Наукові інтереси:

- комп'ютерний зір;
- машинне навчання та нейронні мережі;
- штучний інтелект;
- розробка програмного забезпечення (C, C++, C#, JS/HTML/CSS, Python, Lua);
- мобільна робототехніка.

Kravchuk A.R., Tkachuk A.H., Dobrzanskiy O.O., Bogoyavlenska Yu.V., Tkachuk D.Yu.

Analysis of autonomous UAV navigation methods in GPS-denied environments

The article presents a systematic review and comparative analysis of modern methods of autonomous navigation of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the absence of a GPS signal. The main methods of autonomous navigation are considered: visual (optical flow, visual odometry, visual SLAM), inertial (IMU-based), lidar (LiDAR SLAM), radar, radio frequency (UWB, Wi-Fi, BLE), as well as hybrid multi-sensor systems. Particular attention is paid to the characteristics of navigation systems: positioning accuracy, processing latency, requirements for computing resources, reliability in different conditions and energy consumption level. Various application options for each method are considered, and the possibilities of use are also determined taking into account the technical limitations of the UAV. The results of a comparative analysis are presented, which allows systematizing the advantages and disadvantages of individual solutions depending on the type of environment, computing budget and target problem. Separately, modern trends are analyzed, namely the growing role of adaptive systems with sensor fusion and the involvement of machine learning methods. The main challenges that slow down the widespread implementation of the analyzed systems in practical applications are identified, namely the lack of unified testing methods, energy consumption of complex systems, lack of realistic datasets, the problem of integrating algorithms into various control systems. Promising directions for further research are identified, which include the development of energy-efficient navigation solutions, the integration of deep learning, and the creation of specialized hardware. The results obtained are of practical importance for engineers, developers, and researchers working to increase the autonomy of UAVs in the absence of GPS.

Keywords: unmanned aerial vehicles; autonomous navigation; automated control systems.

The paper «Analysis of autonomous UAV navigation methods in GPS-denied environments» has been developed within the framework of the project “Widen performance in research and innovation capacity and competence Across EU” / “WIDE AcrossEU” 101 158 561 Horizon Europe program. Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or European Research Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.



Стаття надійшла до редакції 04.04.2025.