
Класифікація безпілотних літальних апаратів за типами і технологіями керування

Олександр Вячеславович Троянський

Інститут інформаційної безпеки, радіоелектроніки та телекомунікацій Національного університету «Одеська Політехніка», м. Одеса, Україна

ORCID 0000-0001-9755-6010

Павло Олександрович Кандєєв

Інститут інформаційної безпеки, радіоелектроніки та телекомунікацій Національного університету «Одеська Політехніка», м. Одеса, Україна

ORCID 0009-0009-2777-0789

Анотація: У статті проведено систематичний аналіз основних типів керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) з урахуванням сучасних технологічних підходів. Розглянуто як традиційні методи керування з участю оператора, так і сучасні автономні та напіваавтономні рішення, включаючи ті, що базуються на алгоритмах штучного інтелекту та системах прийняття рішень. Наведено порівняння типів керування, їх переваг та недоліків з огляду на вимоги до надійності, оперативності, стійкості до зовнішніх впливів і залежності від каналу зв'язку. Детальний аналіз вже розроблених типів і технологій допоможе в дослідженні галузі побудови безпілотних апаратів і висвітлить основні технології, а також ті моменти що в майбутньому можуть бути покращені.

Окрему увагу приділено технологіям забезпечення зв'язку між БПЛА та наземними станціями керування. Описано принципи функціонування та характеристики основних каналів зв'язку, зокрема Wi-Fi, радіочастотних та оптоволоконних систем. Розглядається їх вплив на ефективність і безпечність процесу керування. У роботі також акцентується увага на технічних і організаційних викликах, що виникають при інтеграції інтелектуальних систем у архітектуру керування БПЛА.

Класифікація представлених типів керування та технологій зв'язку здійснена за функціональними, структурними та технічними ознаками. Стаття висвітлює широкий спектр підходів до реалізації керування в умовах обмеженої пропускної здатності каналів, загроз порушення зв'язку або кіберзагроз. Це дозволить більш наглядно продемонструвати наскільки різноманітними є підходи до вирішення недоліків різних систем, які були створені за цей час. Представлений аналіз є основою для подальших досліджень у галузі проектування ефективних, надійних і адаптивних систем керування БПЛА, що мають потенціал до подальшого вдосконалення в умовах динамічного розвитку технологій.

Ключові слова: Безпілотні літальні апарати, керування, дрони, класифікація, ручні, напіваавтономні, автономні.

1. Вступ

Безпілотні літальні апарати — це літальні апарати, які працюють без людини-пілота на борту, що керуються дистанційно за допомогою оператора або автономно за допомогою бортових комп'ютерів і систем. БПЛА використовуються для різних цілей: спостереження, розвідки, збору даних і транспортування. Ця сучасна технологія використовується як за цивільним призначенням, так і у військових цілях на тактичному, оперативному та стратегічному рівнях.

БПЛА приділяють увагу за ряд їх переваг:

- доступність;
- зручність у використанні;
- безпечність для самого користувача;
- низьку вартість навчання для операторів.

Ці переваги сприяють поширенню технології і застосування її у різноманітних ситуаціях. БПЛА поступово використовуються для моніторингу навколишнього середовища, включаючи оцінку джерел тепла, життєдіяльності рослин, землекористування, сільського господарства та забруднення повітря [1].

Останні розробки в області комп'ютерного обладнання та програмного забезпечення зробили штучний інтелект ключовим компонентом майже в усіх галузях інженерних досліджень. Штучний інтелект є потужним інструментом для вирішення складних проблем, на які або немає чітких відповідей, або реалізація традиційних методів вимагає значного втручання людини [2].

2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єкт дослідження: Процес управління безпілотними літальними апаратами як комплекс дій, процедур і технічних засобів, що забезпечують керуваність польотом БПЛА.

Предмет дослідження: Ступінь залученості оператора в процес керування безпілотним літальним апаратом, що охоплює варіанти ручного, напівавтоматичного та повністю автономного управління, а також рівень інтерфейсної взаємодії людина–машина. Крім того, предметом є технології, які використовуються для передачі керуючих сигналів та телеметричної інформації між оператором і апаратом, зокрема радіочастотні протоколи, супутникові канали зв'язку, системи наземного керування та інші технічні засоби зв'язку.

3. Мета та задачі дослідження

Протягом останнього десятиліття на тлі розвитку комп'ютерних технологій та технологій автоматичного керування, разом із зростанням швидкості та надійності передачі даних, дослідження в області безпілотних літальних апаратів почали привертати до себе все більше уваги. Причому це стосується не тільки апаратів цивільного призначення, а й військових розробок. Війна в Україні, та широке застосування БПЛА різного призначення на лінії фронту показала всьому світу ефективність і перспективність самої технології, що саме по собі вже потребує додаткового дослідження в цій області.

Метою даної роботи є структурування методів керування безпілотними летальними апаратами та дослідження принципів їх роботи, визначення сильних та слабких сторін кожного з наведених видів.

4. Аналіз літератури

Аналіз досліджень в цій області показав, що багато з них спрямовано на питання керування безпілотними літальними апаратами, в тому числі із застосуванням штучного інтелекту. Ці роботи привносять нові види керування та інструменти, кожен з яких має свої особливості і тонкощі. Для простішого розуміння вже наявних типів керування слід упорядкувати цю інформацію. За цим виникає потреба проаналізувати та структурувати вже наявні типи керування.

5. Методи досліджень

Безпілотні літальні апарати класифікуються за великою кількістю різноманітних критеріїв. Немає єдиного стандарту, коли йдеться про класифікацію БПЛА. Оборонні відомства мають свої власні стандарти, а цивільні особи мають свої постійно змінювані загальні категорії БПЛА. Дуже часто люди класифікують їх за розміром, дальністю та тривалістю польоту та використовують систему рівнів, яка застосовується військовими. Достатньо відомі наступні типи класифікацій, кожна з котрих включає в себе лише певні критерії: Система Класифікації БПЛА НАТО Stanag 4670, Класифікація БПЛА За Даними Міністерства Оборони США, Класифікація БПЛА за типом авіаконструкції, Класифікація за ступенем автономності, Класифікація за висотою польоту, Класифікація БПЛА за типом двигуна, Класифікація за способом застосування [11], але за способом та технологіями керування класифікація ще не була проведена. Отже, спробуємо розглянути за типом керування.

Перший і найпоширеніший тип керування – це ручні БПЛА. При цьому типі керування, оператор має повний контроль над дроном під час його польоту, змінюючи висоту, напрямок і швидкість. Такі дрони не завжди мають системи зйомки та передачі відео сигналу. Керуються вони виключно оператором за допомогою пульта управління, без автоматизованих систем. Керування здійснюється через радіочастотний зв'язок або інші технології бездротової передачі сигналів. Такі апарати вимагають постійної уваги з боку оператора та є зазвичай дуже маневреними.

Серед ручних БПЛА можна виділити окремий підклас дронів з FPV (First-Person View) системою. FPV-дрони надають можливість оператору керувати літальним апаратом у реальному часі в режимі «від першої особи», завдяки встановленим на дроні камерам та передавачу відеосигналу. Це дозволяє оператору бачити з позиції самого дрона, і здійснювати точне управління, навіть у складних умовах міського бою або пересіченої місцевості. Оператор керує дроном за допомогою спеціальних окулярів, спостерігаючи за польотом так, ніби знаходиться всередині машини. Сама абревіатура FPV походить від англійського терміну «First Person View», що означає «вид від першої особи». Одна із основних переваг FPV-дронів полягає у їхній маневреності та швидкості, що робить їх ідеальними для виконання різноманітних тактичних завдань. Ефективність застосування FPV-дронів також полягає в їхній відносно невеликій вартості. Вони значно дешевші у виробництві та обслуговуванні порівняно з традиційними БПЛА [3].

Напівавтомні БПЛА (Semi-autonomous UAVs) з фіксованим крилом є новим класом транспортних засобів, який має багато потенційних застосувань, включаючи військову розвідку малої дальності, пошуково-рятувальні роботи в сільській місцевості, правоохоронні заходи та будь-яке інше завдання, яке було б доцільно виконати за допомогою невеликого недорогого літального апарату.

Інтерфейси керують автопілотом у напівавтомному режимі керування, де користувач задає бажану висоту або кут нахилу, швидкість і кут курсу або крену. Автопілот прагне відповідати бажаним характеристикам польоту користувача, який може змінювати ці параметри в режимі реального часу через радіомодем. Навігаційні рішення приймаються шляхом безпосереднього спостереження за апаратом або через його бортову відеокамеру. Хоча напівавтомний інтерфейс вимагає більшого робочого навантаження на користувача, ніж повністю автономний інтерфейс на основі маршрутних точок, багато додатків міні-БПЛА вимагають від оператора прийняття стратегічних рішень на льоту, що знижує ефективність заздалегідь визначених планів польоту у автономних апаратах.

Інтерфейс, який вимагає від користувача безпосереднього введення параметрів польоту є достатнім для деяких програм, але залишає бажати більшого. У багатьох програмах така точність не є ні потрібною, ні корисною, оскільки від користувачів вимагається чітке

розуміння відповідних значень для кожного параметра, а когнітивні та фізичні вимоги до введення параметрів вносять непотрібні затримки в час реакції користувача[5].

Далі розглянемо автономні БПЛА (Autonomous UAVs). В таких БПЛА нема потреби в людині пілоті, а вони самостійно можуть виконати поставлену задачу, без додаткових втручань. Наразі такі машини можуть виконувати зараз лише певні і заздалегідь визначені задачі. Наприклад, навігаційні системи відповідають за визначення географічних координат розташування БПЛА, та можуть забезпечити його автоматичне переміщення з однієї точки до іншої. Але під час польоту часто трапляються непередбачувані перешкоди (птахи, дерева, будівлі тощо). Автономні БПЛА мають розпізнавати їх, визначати їх розмір та оминати. Ця задача вже дещо складніша. Для вирішення цього завдання та задач з пошуку різних об'єктів (наприклад, людей чи рідкісних диких тварин) застосовують комп'ютерний зір. Використання комп'ютерного зору має на увазі застосування технологій штучного інтелекту. Система отримує зображення від встановлених камер та має проаналізувати їх, керуючись алгоритмами та принципами, що були сформовані під час попереднього навчання [4].

Для виконання масштабних робіт використовують рої дронів. Модель їх взаємодії залежить від рівня автономності БПЛА. Пріоритетним напрямком розвитку даної технології є створення повністю самостійних роїв, що не потребують додаткових інструкцій від оператора в ході виконання поставлених задач. Налаштування комунікації між БПЛА зі штучним інтелектом наразі знаходиться в процесі розробки, але є кілька алгоритмів, що вже успішно використовуються.

Тепер розберемо які ж технології керування використовують, щоб забезпечити різні типи керування. Існує кілька основних технологій керування безпілотними апаратами (БПЛА), що дозволяють здійснювати різні функції на різних рівнях автоматизації.

Радіокерування – традиційний метод, який дозволяє оператору управляти БПЛА за допомогою радіоконтролера на відстані. Зазвичай використовується для моделей дронів або невеликих апаратів.

Для забезпечення зв'язку використовуються різні протоколи зв'язку.

1. RF (Radio Frequency) протоколи є одними з найпоширеніших для бездротового керування дронами, особливо на середніх та великих відстанях. Вони використовують радіочастоти для передачі команд між пультом управління, що часто є наземною станцією та безпілотним літальним апаратом. Більшість комерційних дронів є автономними або дистанційно керованими транспортними засобами, які використовують стандартні діапазони частот 2,4 ГГц. Також часто для відеопередачі від БПЛА до пульта або монітора використовують частоту 5.8 ГГц, оскільки цей діапазон здатний забезпечити високу швидкість передачі відео. Варто зауважити що високі частоти сильно обмежують дальність зв'язку. Також для керування на більш довгих дистанціях використовують і інші частоти, але часто це не серійні, вузькоспеціалізовані (наприклад для військових) чи модифіковані моделі БПЛА. В таких випадках зустрічаються БПЛА керування котрими відбувається на частотах 900 МГц та 433 МГц. У більшості випадків для керування дронами використовується прямий зв'язок між пультом управління та дроном. Зазвичай це двосторонній зв'язок, де пульт передає команди, а дрон повертає дані про свій стан, такі як висота, швидкість, координати GPS, рівень заряду акумулятора. У випадках, коли дрон працює на дуже великих відстанях, можуть використовуватись спеціальні RF-модеми для встановлення більш стабільного та дальнього зв'язку[6].

2. Багато споживчих БПЛА використовують Wi-Fi для керування на коротких відстанях, зокрема для передачі відео та команд. Wi-Fi може бути використаний для дистанційного керування через мобільний додаток або комп'ютер.

Між пультом дистанційного керування (RC) та дроном використовується кілька каналів зв'язку. Цей зв'язок контролює рух дрона, обмін інформацією, передачу відео та стан. Одним з найпоширеніших протоколів зв'язку, що використовуються в дронах, є протокол Wi-Fi, за яким йде радіочастота, а дрон малої дальності іноді використовує Bluetooth. DJI — відомий

виробник споживчих дронів, відомий своїм різноманітним асортиментом моделей, що пропонують різні функції. Зокрема, деякі дрони низького класу оснащені покращеною функцією WiFi, що надає користувачам можливість вибирати бажану робочу частоту. Однак рівень безпеки, що забезпечується цим розширеним протоколом Wi-Fi, залишається невизначеним через обмеженість досліджень у цій галузі. [13]

Wi-Fi працює у двох основних частотних діапазонах: 2,4 ГГц та 5 ГГц. Діапазон 2,4 ГГц, один із тих, що з'явився найраніше для Wi-Fi та пропонує хороше покриття та подолання фізичних перепон, але схильний до перевантажень та сигнальних перешкод через свою популярність та співіснування з іншими бездротовими пристроями. Всього є 14 каналів, з яких лише три неперекриваються (1, 6 та 11).

Натомість, діапазон 5 ГГц пропонує ширшу пропускну здатність каналу та менше перевантаження, що, призводить до вищої швидкості передачі даних та покращеної продуктивності. Хоча він має ширший діапазон каналів, покриття обмежене порівняно з діапазоном 2,4 ГГц.

Ширина каналу Wi-Fi стосується діапазону частот, що використовуються для передачі даних у бездротовій мережі. Хоча ширина каналу 5 МГц використовувалася в старих стандартах Wi-Fi, таких як 802.11a, важливо уточнити, що ця ширина каналу більше не є поширеною в сучасних мережах Wi-Fi. Натомість, стандартні ширини каналів, що використовуються сьогодні, становлять 20 МГц, 40 МГц, 80 МГц і навіть 160 МГц у деяких випадках. Ширина каналу 5 МГц була обмежена в пропускну здатності передачі даних і здебільшого використовувалася в ранніх мережах Wi-Fi з нижчими вимогами до швидкості передачі даних. З розвитком технології Wi-Fi та зростанням попиту на вищі швидкості передачі даних, ширші ширини каналів стали необхідними для забезпечення вищої пропускну здатності даних[13].

3. MAVLink (Micro Air Vehicle Link) — це відкритий протокол зв'язку, який широко використовується для обміну даними між безпілотними літальними апаратами (БПЛА) та наземними станціями, а також для зв'язку між різними компонентами в системі управління дроном. Він став стандартом для багатьох платформ БПЛА, таких як ArduPilot і PX4, завдяки своїй гнучкості, надійності та відкритому коду. MAVLink розроблений для передачі важливих даних в реальному часі, таких як телеметрія, позиціонування (GPS), дані сенсорів, та команди управління. Це дозволяє забезпечити точне й надійне управління дронами навіть на великих відстанях або у складних умовах.

MAVLink дозволяє передавати різноманітні типи даних, що включають:

- телеметрію – це дані про стан дрона, такі як висота, швидкість, курс, рівень заряду акумулятора, температура тощо;
- команди управління – це команди на зміну режиму польоту, орієнтацію, зміщення по координатах, активація різних режимів польоту;
- сенсори – це інформація від гіроскопів, акселерометрів, барометрів та інших сенсорів;
- відео – це дані із зображеннями чи відеосигнал з камери, що може передаватися через окремі канали.

MAVLink використовує формат повідомлень, де кожне повідомлення складається з заголовка, ідентифікатора повідомлення, корисного навантаження (payload) та контрольної суми для перевірки цілісності даних. Повідомлення MAVLink мають числові ідентифікатори, що дозволяють однозначно визначити тип даних і їх призначення. MAVLink має архітектуру, що дозволяє додавати нові повідомлення та протоколи, без зміни основного ядра. Це робить його зручним для інтеграції в різні системи та для розробки нових функцій, таких як додаткові сенсори або спеціалізовані режими польоту[7].

Враховуючи вищезазначені протоколи зв'язку, протягом останніх кількох років для ідентифікації та відстеження дронів було застосовано кілька контрзаходів на основі аудіо-, відео-, теплових і радіочастотних сигналів. Дійсно, більшість критично важливих інфраструктур використовують радіочастотні / пеленгаційні і кінематичні радарні датчики, які

відстежують усі типи дронів, аналізуючи відбиті сигнали та порівнюючи їх із базою даних для характеристики дронів. Через велику кількість несанкціонованих БПЛА, що працюють у небі, вкрай важливо розгорнути системну структуру для відстеження, класифікації та ідентифікації своєчасних зловмисних БПЛА, використовуючи дані, надані радарними датчиками.

На фоні росту кількості безпілотних літальних апаратів, які використовують для передачі даних технології на основі радіозв'язку зростає і потреба в способах протидії їм. Основним способом протидії безпілотним літальним апаратам є системи радіоелектронної боротьби.

Радіоелектронна боротьба охоплює науку підтримки контролю над електромагнітним спектром який не заважає союзним силам і водночас викликає завади для супротивника. У контексті БПЛА це, перш за все, включає військову тактику, таку як збір інформації та зрив операцій шляхом використання каналів зв'язку БПЛА. Ця галузь ведення війни є сферою досліджень яка активно розвивається. Зі зростаючим акцентом на розробці стратегій та методів, які можуть як захистити дружні БПЛА від ворожих суб'єктів, так і порушити комунікації БПЛА супротивника. Для цивільних БПЛА цей тип війни частіше згадується в ширшому сенсі стосовно кібербезпеки та кібератак.[9]

В описових моделях РЕБ для оцінювання потенційної перешкодової обстановки частіше використовуються базові аналітичні моделі розрахунку зон подавлення, математичні вирази і моделі, відомі з теорії радіозв'язку, теорії електродинаміки та поширення радіохвиль, а також теорії імовірності. Зазначені аналітичні математичні моделі дають змогу розраховувати типові енергетичні й тактичні показники, які характеризують вплив радіоперешкод на певні радіоелектронні системи і засоби[8]. Тема радіоелектронної боротьби, та захисту від нього є окремою сферою досліджень, яка згадується тут лише як один із факторів для класифікації бпла.

Перейдемо до оптоволоконних БПЛА - це безпілотні технології, оснащені оптоволоконними системами зв'язку та передачі даних. Система зв'язку між наземною станцією та безпілотним літальним апаратом, що використовує оптоволокно як фізичне середовище передачі, функціонує на основі двонаправленої оптичної лінії зв'язку, яка забезпечує одночасну трансляцію сигналів управління та телеметрії. У такій архітектурі ключовими структурними компонентами є Наземна станція зв'язку, Бортовий комунікаційний модуль БПЛА і самий кабель оптоволокону. Наземна станція зазвичай складається із оптичний трансмітер - здійснює модуляцію електричних сигналів (управління або даних) на оптичне випромінювання, оптичний приймач — демодулятор, що перетворює прийняті з БПЛА оптичні сигнали назад у електричні, інтерфейс управління — обробляє сигнали користувача або автоматизованої системи управління. Бортовий комунікаційний модуль БПЛА містить оптичний приймач та передавач, інтегровані в систему керування польотом, перетворювачі живлення (у разі використання PoF), які забезпечують трансформацію оптичної енергії в електричну для живлення бортових систем. Оптоволоконний кабель, який виконує функцію фізичного каналу. Використовується одномодовий або багатомодовий волоконно-оптичний світловод з низьким коефіцієнтом загасання, що забезпечує мінімальні втрати сигналу та стійкість до електромагнітних завад. Додатково можливе використання армованих або легких високоміцних конструкцій кабелю, адаптованих до аеродинамічного навантаження.

Такі апарати мають низку технічних особливостей, які відрізняють їх від традиційних безпілотників, що працюють на радіосигналах або бездротових комунікаціях.

Зазвичай БПЛА використовують канали зв'язку для керування апаратом та передачі даних до станції. Через критичний характер інформації, що надсилається до БПЛА та з нього, висока пропускна здатність та швидка передача на великі відстані є вкрай важливими для її успіху. Оптоволоконні апарати забезпечують необхідну пропускну здатність та можливості передачі з додатковою перевагою стійкості до електромагнітних перешкод та радіочастотних перешкод, що робить їх ідеальним рішенням для цих застосувань.

До того ж такі БПЛА можуть вирішувати і іншу проблему. Бортовий акумулятор становить більшу частину загальної ваги дрона, що збільшує споживання енергії та є основним обмежувальним фактором для його корисного навантаження. Power-over-fiber (PWoF) — це усталена та практична технологія, яка дозволяє передавати енергію по легких, непровідних лініях зі скловолокна. Нещодавно повідомлялося про одночасне вироблення електроенергії, що перевищує 40 Вт, разом з оптичними сигналами даних.[12]

Дрон та наземна станція з'єднані двома оптичними волокнами, припускаючи, що для передачі радіочастотних даних та сигналів керування використовується стандартне одномодове волокно (SSMF), а для живлення через оптоволоконне з'єднання — багатомодове волокно (MMF) з великим діаметром сердечини. [12]

Основна особливість оптоволоконного БПЛА використання оптоволоконного кабелю для передачі інформації з БПЛА на наземну станцію. Це забезпечує значно вищу швидкість передачі даних у порівнянні з традиційними бездротовими каналами. Завдяки оптоволоконному з'єднанню можна забезпечити швидку передачу даних без втрат, що дає зменшений час реакцій й підвищену точність керування дроном, що є важливим в умовах високих вимог до точності та реального часу, наприклад, у військових або на промисловості.

Оптоволоконні системи мають високу стійкість до зовнішніх електромагнітних впливів, таких як радіочастотні перешкоди. Це робить такі системи більш надійними у порівнянні з традиційними бездротовими системами. Оскільки передача даних здійснюється через оптоволокло, такі БПЛА можуть оснащуватися додатковими системами, такими як високоякісні камери, сенсори, радарні системи, що потребують стабільного і швидкого каналу зв'язку.

Однак, ця технологія не обійшлась і без мінусів. Обмежується мобільність, так як певні маневри перестають бути доступні через дріт, що може завадити його виконанню. Також кабель для передачі даних і живлення має певну довжину, що обмежує радіус дії БПЛА. Також мають бути забезпечені певні умов для того щоб кабель лягав рівно, і не чіплявся за об'єкти. До того ж збільшується ціна виробу. Не дивлячись на те що ціна на оптоволокло з кожним роком все зменшується, масове використання все ще затратне. Важливим пунктом також може стати і зменшення ефективного навантаження БПЛА, через те що саме волокно має вагу, яке зменшує можливу переносимо вагу.

Далі розглянемо автономне управління, де використовуються складні алгоритми, що дозволяють БПЛА працювати без участі людини або з мінімальним втручанням оператора. Наприклад, для автоматичного виконання місії (слідуючи за заданим маршрутом, ухиляючись від перешкод тощо) застосовуються системи на основі комп'ютерного зору, лідар (лазерні далекомірні системи), ультразвукові сенсори та інші технології.

Системи автономного управління складаються із двох основних складових: апаратної, програмної. До апаратної належать різноманітні сенсори і датчики, а також контролер.

Мікроконтролери - це основні елементи для обробки інформації, отриманої від сенсорів і для виконання алгоритмів керування польотом. Вони обчислюють, які саме команди потрібно відправити на мотори для забезпечення стабільного і безпечного польоту.

Для автономії БПЛА необхідні різні сенсори. Для вимірювання прискорення і кутові швидкості використовують інерціальний вимірювальний блок, допомагаючи визначити орієнтацію апарата, GPS для визначення місцезнаходження БПЛА в реальному часі, Лідар для сканування навколишнього середовища за допомогою лазерних імпульсів для створення 3D-карт місцевості та виявлення перешкод, камери за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору можна здійснювати ідентифікацію об'єктів, розпізнавати перешкоди або стежити за іншими об'єктами.

До програмної частини належать різноманітні алгоритми контролю: алгоритми для навігації, що визначають, як БПЛА буде рухатися від початкової точки до кінцевої, включаючи планування маршруту, до систем стабілізації, врахування перешкод та корекції траєкторій.

Дуже часто автономність підтримується на рівні виконання ряду певних простих задач. До них відносять: автономний зліт та посадка, автономне планування маршрутів, автономна взаємодія з іншими БПЛА та утримання заданої позиції.

Автономний зліт та посадка, де дрони можуть автоматично підніматися в повітря і приземлятися, враховуючи перешкоди, погодні умови і поверхню землі, що позбавляє від людських помилок, під час цього процесу.

Основна ідея алгоритму виявлення ідентифікації на основі глибокого навчання полягає в оптимізації алгоритму виявлення цілі з точки зору швидкості виявлення, точності виявлення та легковажності моделі, а також інтеграції алгоритмів усунення димки, усунення розмиття та інших для адаптації до складних сцен у практичних застосуваннях, досягнення високої точності та виявлення ідентифікації в режимі реального часу, що зрештою відповідає початковим вимогам. Порівняно з традиційними алгоритмами виявлення на основі ознак, алгоритми виявлення на основі глибокого навчання мають гарне узагальнення, меншу залежність від конкретних логотипів, високу стійкість та широкі перспективи застосування[14].

У процесі виконання БПЛА складних завдань ціль, як правило, рухається. Водночас, реалізація технології посадки на рухомі цілі також закладає основу для автономної посадки БПЛА у складних сценаріях. Порівняно зі статичними сценами, складність динамічних сцен значно вища, що вимагає підвищення рівня навігаційної системи та системи керування БПЛА. Тим часом, цілі місії двох типів посадки майже однакові, а це означає, що згадані вище методи автономної посадки у статичних сценах також широко використовуються в динамічних сценах.

Автономну посадку БПЛА на рухомі платформи можна приблизно розділити на такі напрямки: наведення зовнішнім допоміжним обладнанням, візуальна навігація, об'єднання багатосенсорних даних та новітній метод керування на основі навчання, який також швидко розвивався. Через складність рухомої платформи, сучасні алгоритми виявлення та розпізнавання цілей не можуть надійно ідентифікувати та відстежувати характеристики самої посадкової платформи. Тому більшість існуючих досліджень додають кооперативні цілі та досягають автономної навігації шляхом ідентифікації кооперативних цілей з відмінними ознаками. Залежно від різних сценаріїв місії, досягнення будуть розділені на платформи, встановлені на транспортних засобах, та корабельні платформи для досліджень[14].

Автономне планування маршрутів, де в залежності від завдання БПЛА можуть самостійно прокладати маршрут, враховуючи координати GPS і аналізуючи місцевість за допомогою сенсорів. Ефективне планування шляху є важливим елементом для операцій БПЛА, оскільки воно дозволяє БПЛА розрахувати найкращий можливий шлях від його поточного місцезнаходження до цільового пункту призначення, уникаючи перешкод та дотримуючись експлуатаційних обмежень. БПЛА використовує алгоритми планування шляху для обчислення та оптимізації найефективнішого маршруту, враховуючи статичний або динамічний характер навколишнього середовища. Уникнення та виявлення перешкод у режимі реального часу дозволяє БПЛА зосереджуватися на навколишньому середовищі та змінювати курс за потреби, щоб уникнути зіткнень. Виявляючи перешкоди або зміни умов, БПЛА коригує свою траєкторію, щоб забезпечити безпеку та оптимально підвищити продуктивність. Нарешті, БПЛА дотримується запланованого маршруту, постійно адаптуючись до будь-яких неочікуваних відхилень. Ця процедура забезпечує надійну, ефективну та безпечну навігацію на складній місцевості, за непередбачуваних обставин та за експлуатаційних обмежень.

Утримування позицій чи слідування за ціллю, що дає дрону можливість зависати в певній точці простору не дивлячись на фактори зовнішнього впливу, а також переслідувати та стежити за ціллю, рухаючись за нею.

Відстеження та переслідування рухомих цілей з повітря має різноманітне застосування, включаючи пошуково-рятувальні роботи, поліцейські переслідування та моніторинг

транспортних засобів. Крім того, ця можливість сприяє покращеній співпраці між повітряними та наземними роботизованими системами, наприклад, дозволяє БПЛА приземлятися на наземні транспортні засоби для підзарядки або іншої логістичної підтримки, або для огляду рухомих конструкцій. У таких динамічних середовищах, де може бути видно кілька цілей, для систем БПЛА вкрай важливо не лише відстежувати основну ціль, але й підтримувати обізнаність про інші відповідні об'єкти в полі зору. Проблема візуального відстеження мобільних цілей (МТТ) та їх супроводження охоплює виявлення цілі, а потім алгоритм відстеження цілі, який контролює її положення з плином часу на зображенні. Нарешті, обчислюється положення цілі відносно БПЛА, щоб надати зворотний зв'язок контролеру та дозволити відстеження цілі. Наразі існує розрив між двома різними стратегіями, які здійснюють відстеження цілей на зображенні: підходи відстеження одного об'єкта (SOT), де на зображенні виявляється та відстежується лише ціль, що цікавить, та підходи відстеження кількох об'єктів (MOT), де система виявляє та відстежує всі цілі, що цікавлять, на зображенні та призначає кожній з них певний ідентифікатор. Алгоритми керування для відстеження мобільних цілей варіюються, від прямих 3D-позиційних введів до використання пропорційної навігації (PN) з каскадними PID-контролерами. Також використовується перемикальна стратегія відстеження на основі оціненої відстані, що переходить між режимами спостереження та відстеження з різними методами керування. Багато існуючих методів оцінки відстані мають обмеження в точному позиціонуванні цілі, що підкреслює необхідність більш точних методів. Включення модуля глибинного зондування, коли це можливо, є перспективним рішенням для вирішення цієї проблеми, як це запропоновано [15].

Автономна взаємодія з іншими БПЛА у складних сценаріях, де працює кілька дронів, БПЛА можуть автономно взаємодіяти один з одним, координуючи свої дії, щоб уникнути зіткнень і досягти спільної мети

Окремо від автономних БПЛА виділимо так званий «Бджолиний рій», який несе в собі основні ідеї повністю автономних БПЛА, але доповнює і розширює певні аспекти. Для масового використання ударних БПЛА пропонується створити систему польоту угруповання за типом "бджолиний рій", в якому на рівні простих, в радіоелектронному оснащенні, буде присутній БПЛА, так звана "матка", який буде мати лінію комунікації з центром керування, для коригування місця маршруту польоту "рою" та передачі необхідних даних.

Його функцією буде передача іншим БПЛА команд на зміну маршруту, координат польоту, висоти або закінчення виконання завдання. Для підвищення ефективності протидії та можливостей систем керування, кількість роїв можна збільшувати, розподіляючи їх у повітряному просторі. Другорядні БПЛА в рої будуть мати спрощену систему комунікації з "маткою" без власного випромінювання, що спрощує радіо електромагнітну сумісність та зменшує радіо помітність та в результаті підвищує живучість, як окремих дронів так і всього угруповання.[10]

6. Результати досліджень

В ході роботи були розглянуті усі основні типи керування безпілотними літальними апаратами та технології керування які можуть забезпечити їх. Було визначено, що не дивлячись на різноманітність самих моделей безпілотних літальних апаратів, їх легко можна розділити на три прості категорії: ручні, напівавтономні та автономні. Вони повністю охоплюють увесь набір сучасних безпілотних апаратів з точки зору їх керування. Варто зауважити що група напівавтономних безпілотних літальних апаратів є досить великою, і виділити в середині неї підгрупи є неможливою, через велику кількість рівнів автономії якого досягають сучасні моделі, і часто поєднуючи їх в середині одного апарату.

На рисунку 1 схематичне зображення описаної класифікації за типами керування.



Рисунок 1. Схема розподілення БПЛА за типами керування.

З точки зору технологій керування і зв'язку то дослідження показало, що радіокерування є найчастіше використовуваним, не дивлячись на усі складнощі. Було розглянуто основні варіації радіокерування і виділена основна причина його масовості. Неочікувано себе проявила технологія керування із використанням оптоволокна, так як вона налягає ряд суттєвих обмежень на безпілотні апарати. Але в умовах сильних радіоперешкод, такі апарати себе показують бездоганно, як через незалежність від радіосигналів.

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Розуміння того як керуються безпілотні літальні апарати та які технології для їх керування існують на даний час, дає можливість краще розуміти та сприймати картину подальшого розвитку цієї галузі. Що є перспективними технологіями, які вже вичерпали себе і що з поточних методів та технологій слід розробляти далі для покращення. Подальші дослідження зосереджуються на рівнях автономності, де БПЛА поділяються від повністю ручного до повністю автономного керування. Удосконалення класифікації з урахуванням типів зв'язку та методів взаємодії з оператором: пряме керування, напівавтомонні режими, автономне керування та машинне навчання.

8. Висновки

Безпілотні літальні апарати — це літальні апарати, які працюють без людини-пілота на борту, що керуються дистанційно за допомогою оператора або автономно за допомогою бортових комп'ютерів і систем. Способи їх застосування є досить широкими, і мають великий потенціал до подальшого дослідження. В ході роботи були розглянуті як і різні тимпи керування так і технології керування.

З точки зору типів керування було виділено три великі групи: ручні, напівавтомонні, та автономні безпілотні літальні апарати. У ручних безпілотних літальних апаратах оператор має повний контроль над дроном під час його польоту, змінюючи висоту, напрямок і швидкість. Керуються вони виключно оператором за допомогою пульта управління, без автоматизованих систем. Такі апарати вимагають постійної уваги з боку оператора. Цей достатньо великий мінус компенсується неймовірно високою маневреністю апаратів і можливістю миттєво приймати рішення щодо нештатних ситуацій. Напівавтомонні хоч і мають гіршу маневреність, їх перевагою буде відсутність постійного контролю зі сторони оператора. Автономна частина такого апарата візьме на себе більшу частин різних етапів польоту. В такому випадку майстерність пілота вже не така суттєву і значна а його навчання стає значно швидшим. Оператор має лише залишати інструкції або корегувати вже поставлені. Автономні апарати в свою чергу мають отримати усі інструкції до запуску, так як в процесі виконання задачі, зміни

вже неможливі, а усі рішення приймає його автономна частина. Такий апарат не потребує над собою контролю. Але його виготовлення є достатньо складним і дорогим, до того ж різноманітні нештатні ситуації можуть призводити до серйозних проблем під час польоту. Даний тип керування є одним із тих що активно розвивається.

З точки зору технологій керування найбільш поширеним є радіокерування. Це пов'язано із доступністю, поширеністю, легкістю організації та можливістю забезпечити зв'язок на велику відстань. Але у зв'язку із покращенням технології оптоволокна, здешевлення виробництва та розповсюдженням, оптоволоконні безпілотні літальні апарати можуть зіставити непогану конкуренцію технології радіозв'язку. Хоч апарати із оптоволоконном і мають гіршу маневреність, обмежену переносимо вагу, та неможливість виконання певних маневрів, такі апарати мають одну сильну перевагу – захист від радіоперешкод та перехоплення, що є важливим з військової точки зору.

Розглянувши усі ці особливості керування безпілотними апаратами, вдалось скласти повну картину того, що ж відбувається в цій галузі з точки зору керування, виділити сильні і слабкі місця кожного окремого типу та технології керування, що дає можливість правильно оцінити і вибудувати подальші кроки щодо того які покращення можна в них внести.

Список літератури:

- 1) Manfreda, S., McCabe, MF., Miller, PE., Lucas, R., Pajuelo Madrigal, V., Mallinis, G., Ben Dor, E., Helman, D., Estes, L., Ciraolo, G., et al. (2018) On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring. *Remote sensing*, 10(4). doi: <https://doi.org/10.3390/rs10040641>
- 2) Xu, Y., Liu, X., Cao, X., Huang, C., Liu, E., Qian, S., Liu, X., Wu, Y., Dong, F., Qiu, C-W., et al. (2021). Artificial intelligence: a powerful paradigm for scientific research. *Innovation*, 2(4). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100179>
- 3) Худов, Г., Хижняк, І., Грідасов, І., Збежховська, У., Юзова, І., Соломоненко, Ю., Калімулін, Т. (2024). Аналіз тактико-технічних характеристик та тактики застосування існуючих ударних frv-дронів. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 3 (77), 70-79. Doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.3.070>
- 4) Муравйов, О., Довбиш, І., Галаган, Р., Богдан, Г., Момот, А.. (2023). Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА. *Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація*. Doi: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/32>
- 5) M. Quigley, M. A. Goodrich and R. W. Beard, "Semi-autonomous human-UAV interfaces for fixed-wing mini-UAVs," 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566), Sendai, Japan, 2004, pp. 2457-2462 vol.3, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2004.1389777>
- 6) БПЛА «Привид». 1.2 ГГц чи 5.8 ГГц для передачі відеопотоку? Available at: <https://pryvyd.com.ua/5-8-ggz-video-transmitter/>
- 7) MAVLink. Microservices. Available at: <https://mavlink.io/en/services/>
- 8) Шовкошитний, І. (2024) «Математична модель оцінювання ефективності системи радіоелектронної боротьби з безпілотними літальними апаратами на основі ймовірнісного підходу», *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ, Україна, 49(1), с. 35–44. doi: 10.33099/2311-7249/2024-49-1-35-44.
- 9) Yu A., Kolotylo I., Hashim A., Eltoukhy E., (2025) «Electronic Warfare Cyberattacks, Countermeasures and Modern Defensive Strategies of UAV Avionics: A Survey». Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.07358>
- 10) Кочерга, І. (2023) «Підвищення ефективності застосування безпілотних літальних апаратів в умовах протидії засобів радіоелектронної боротьби». *Авіація, промисловість, суспільство : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф.* Available at: <https://dspace.univd.edu.ua/handle/123456789/17652>

- 11) Tachinina O., Lysenko A., Kutieпов V., (2022) «Classification of Modern Unmanned Aerial Vehicles». National Aviation University. Electronics and Control system. Doi: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.74.17354>
- 12) Shindo N, Kobatake T, Masson D, Fafard S, Matsuura M. Optically Powered and Controlled Drones Using Optical Fibers for Airborne Base Stations. *Photonics*. 2022; 9(11):882. Doi: <https://doi.org/10.3390/photonics9110882>
- 13) Pratama D., Moon J., Mahardika A., Laksmono A., Yun D., Muhammad I., Jeong B., Ji J., Kim H., (2023) «Behind The Wings: The Case of Reverse Engineering and Drone Hijacking in DJI Enhanced Wi-Fi Protocol». Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.05913>
- 14) Xin L, Tang Z, Gai W, Liu H. Vision-Based Autonomous Landing for the UAV: A Review. *Aerospace*. 2022; 9(11):634. <https://doi.org/10.3390/aerospace9110634>
- 15) Ferreira D, Basiri M. Dynamic Target Tracking and Following with UAVs Using Multi-Target Information: Leveraging YOLOv8 and MOT Algorithms. *Drones*. 2024; 8(9):488. <https://doi.org/10.3390/drones8090488>

Classification of unmanned aerial vehicles by types and control technologies

Oleksandr Viacheslavovych Troyanskiy

Educational and scientific institute of information security, radio-electronics and telecommunications of Odessa Polytechnic National University, Ukraine
ORCID 0000-0001-9755-6010

Pavlo Oleksandrovykh Kandieiev

Educational and scientific institute of information security, radio-electronics and telecommunications of Odessa Polytechnic National University, Ukraine
ORCID 0009-0009-2777-0789

Abstract: The article provides a systematic analysis of the main types of unmanned aerial vehicle (UAV) control, taking into account modern technological approaches. Both traditional methods of control with the participation of an operator and modern autonomous and semi-autonomous solutions, including those based on artificial intelligence algorithms and decision-making systems, are considered. A comparison of control types, their advantages and disadvantages is provided, taking into account the requirements for reliability, efficiency, resistance to external influences and dependence on the communication channel. A detailed analysis of the types and technologies already developed will help in the study of the field of unmanned vehicles construction and will highlight the main technologies, as well as those aspects that can be improved in the future.

Particular attention is paid to the technologies of communication between UAVs and ground control stations. The principles of operation and characteristics of the main communication channels, including Wi-Fi, radio frequency and fiber optic systems, are described. Their impact on the efficiency and safety of the control process is considered. The paper also focuses on the technical and organizational challenges that arise when integrating intelligent systems into the UAV control architecture.

The classification of the presented types of control and communication technologies is based on functional, structural and technical features. The article highlights a wide range of approaches to implementing control in the face of limited channel bandwidth, threats of communication disruption or cyber threats. This will allow us to demonstrate more clearly how diverse are the approaches to addressing the shortcomings of various systems that have been created over time. The presented analysis is the basis for further research in the field of designing efficient, reliable, and adaptive UAV control systems that have the potential for further improvement in the face of dynamic technological development.

Keywords: Unmanned aerial vehicles, control, drones, classification, manual, semi-autonomous, autonomous
