

О. В. МУРАВІЙОВ

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**АВТОНОМНІСТЬ БПЛА: КЛАСИФІКАЦІЯ,  
ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ**

У статті проведено системний аналіз рівнів автономності безпілотних літальних апаратів та визначено їх ключові функціональні характеристики з урахуванням сучасного розвитку технологій автоматизації та штучного інтелекту. Узагальнено існуючі підходи до класифікації автономності БПЛА за ступенем участі оператора у процесах управління, навігації, планування місії та прийняття рішень. Визначено особливості функціонування безпілотних систем на кожному рівні автономності та встановлено їх вплив на ефективність виконання завдань, надійність роботи та здатність адаптуватися до динамічних умов середовища. Проаналізовано сучасні наукові дослідження у сфері використання алгоритмів машинного навчання, комп'ютерного зору, сенсорної інтеграції та інтелектуальних систем управління. Особливу увагу приділено новітнім технологіям 2025–2026 років, зокрема застосуванню великих мовних моделей для формування поведінкових алгоритмів, використанню навчання з підкріпленням для автономної навігації, впровадженню систем візуально-мовної навігації та розподілених обчислювальних архітектур. Визначено основні технічні фактори, що обмежують підвищення автономності, серед яких енергетичні характеристики, продуктивність бортових обчислювальних систем, точність сенсорної інформації та стійкість каналів зв'язку. Виділено перспективні напрями розвитку автономних БПЛА, що включають інтелектуалізацію систем управління, розвиток ройових технологій, підвищення енергоефективності та впровадження адаптивних алгоритмів прийняття рішень. Показано, що інтеграція зазначених технологій дозволяє підвищити рівень ситуаційної обізнаності безпілотних систем та забезпечити їх здатність до самостійного виконання складних місій без постійного контролю оператора. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення перспективних авіаційних платформ та програмного забезпечення автономного управління. Запропоновані узагальнення мають прикладне значення та створюють основу для подальших досліджень у напрямі підвищення інтелектуальної автономності.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, БПЛА, підвищення автономності, рівні автономності, штучний інтелект, навігація, комп'ютерний зір, ройове використання.

O. V. MURAVIOV

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

**UAV AUTONOMY: CLASSIFICATION, OPERATIONAL FEATURES  
AND ENHANCEMENT APPROACHES**

The paper presents a systematic study of autonomy levels of unmanned aerial vehicles and defines their main functional characteristics considering recent advances in robotics and artificial intelligence. Existing approaches to UAV autonomy classification are summarized according to the degree of human involvement in control, navigation, mission planning and decision making. The operational features of UAV systems at different autonomy levels are analyzed and their impact on mission effectiveness, operational reliability and adaptability to dynamic environments is determined. Recent scientific studies devoted to artificial intelligence, computer vision, multi sensor data fusion and intelligent control architectures are reviewed. Particular attention is paid to emerging technologies of 2025–2026 including the use of large language models for behavior generation, reinforcement learning for autonomous navigation, vision language navigation frameworks and distributed cloud edge computing solutions. Key technical constraints limiting autonomy growth such as energy capacity, onboard processing performance, sensor accuracy and communication robustness are identified. Promising directions for improving UAV autonomy are formulated including the development of autonomous decision making algorithms, cooperative swarm interaction, adaptive control strategies and energy efficient system design. It is shown that the integration of these technologies significantly improves situational awareness and enables long duration autonomous missions with minimal operator supervision. The obtained results may be applied in the design of next generation unmanned aerial platforms and advanced autonomous control software. The presented analysis also provides a basis for further research focused on cognitive autonomy and resilient UAV architectures. The study emphasizes the importance of combining algorithmic intelligence with reliable hardware components. The conclusions have practical engineering relevance. The findings are applicable to real UAV missions today.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, UAV, autonomy enhancement, autonomy levels, artificial intelligence, navigation, computer vision, swarm deployment.

### Постановка проблеми

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів є однією з найбільш характерних ознак сучасного етапу розвитку авіаційної техніки, робототехніки та інтелектуальних інформаційних систем. Протягом останнього десятиліття безпілотні технології трансформувалися з вузькоспеціалізованих військових засобів в універсальні інструменти, що широко застосовуються у цивільних, наукових, промислових та безпекових сферах. Зокрема, БПЛА активно використовуються для аерофотозйомки, моніторингу інфраструктури, виконання пошуково-рятувальних операцій, контролю стану навколишнього середовища, точного землеробства, логістики та телекомунікацій.

Однією з ключових тенденцій розвитку сучасних безпілотних систем є поступове підвищення рівня їх автономності. Якщо перші покоління БПЛА фактично являли собою дистанційно керовані літальні апарати, що повністю залежали від оператора, сучасні системи дедалі частіше оснащуються засобами автоматичної навігації, комп'ютерного зору, елементами штучного інтелекту та адаптивними алгоритмами управління. Це дозволяє значно зменшити навантаження на оператора, підвищити ефективність виконання завдань та забезпечити функціонування безпілотних систем у складних або небезпечних умовах.

Особливої актуальності питання автономності БПЛА набуває в умовах зростаючих вимог до швидкості обробки інформації, точності навігації та здатності систем працювати в умовах невизначеності. Сучасні сценарії застосування безпілотних літальних апаратів часто передбачають їх функціонування у середовищах, де обмежений або відсутній стабільний зв'язок з оператором, присутні динамічні перешкоди або швидко змінюються умови виконання місії. У таких випадках саме рівень автономності визначає ефективність, надійність та безпечність застосування безпілотної системи.

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень у галузі безпілотних систем, питання систематизації рівнів автономності БПЛА, визначення їх функціональних особливостей та формування ефективних шляхів підвищення автономності залишаються актуальними. Це пояснюється міждисциплінарним характером проблеми, яка охоплює питання авіаційного проектування, навігації, обробки сигналів, штучного інтелекту, енергетики та телекомунікацій. Крім того, швидкий розвиток технологій постійно змінює уявлення про можливості автономних систем, що потребує регулярного узагальнення сучасних підходів та технологічних рішень. Підвищення рівня автономності БПЛА безпосередньо пов'язане з розвитком таких технологічних напрямів, як вбудовані обчислювальні системи, сенсорні комплекси, системи технічного зору, алгоритми машинного навчання та енергоефективні джерела живлення. Комплексне поєднання цих технологій формує основу для створення інтелектуальних безпілотних платформ нового покоління, здатних самостійно аналізувати ситуацію, приймати рішення та адаптувати свою поведінку відповідно до умов виконання завдання.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У наукових роботах, присвячених автономності БПЛА, значна увага приділяється питанням класифікації рівнів автономності. Зокрема, відзначається відсутність універсальної стандартизованої шкали автономності, розробленої саме для безпілотних авіаційних систем, у зв'язку з чим часто застосовуються адаптовані підходи, запозичені з класифікацій автономних транспортних засобів. Такий підхід дозволяє систематизувати можливості БПЛА залежно від кількості функцій, що виконуються без участі оператора, а також ступеня незалежності під час прийняття рішень.

Окремий напрям досліджень пов'язаний з аналізом технологій, що забезпечують підвищення рівня автономності БПЛА. До них належать інерціальні навігаційні системи, глобальні навігаційні супутникові системи та системи навігації на основі комп'ютерного зору. Застосування комплексного підходу до навігації дозволяє підвищити точність визначення координат

БпЛА та забезпечити його стабільне функціонування навіть у випадках втрати сигналів супутникової навігації.

Значна кількість сучасних досліджень присвячена використанню систем технічного зору як одного з ключових елементів автономності. Зокрема, розглядаються методи сегментації зображень, детектування об'єктів та використання обмежувальних рамок для швидкого виявлення перешкод. Дані підходи дозволяють БпЛА аналізувати навколишнє середовище, ідентифікувати об'єкти та формувати відповідні реакції залежно від умов польоту [1].

Важливим напрямом наукових досліджень є також інтеграція різноманітних сенсорних систем у конструкцію БпЛА. Зокрема, досліджується ефективність використання інфрачервоних та мультиспектральних камер, які дозволяють не лише отримувати візуальну інформацію, але й аналізувати фізичні параметри об'єктів, такі як температура або спектральні характеристики поверхонь. Це значно розширює функціональні можливості БпЛА та створює передумови для їх більш автономного застосування у різних сферах діяльності.

Окрему групу досліджень становлять роботи, присвячені проблемам енергозабезпечення безпілотних літальних апаратів. У них розглядаються питання оптимізації співвідношення маси, енергоспоживання та тривалості польоту, а також можливості використання альтернативних джерел енергії, зокрема водневих паливних елементів, сонячних батарей та гібридних силових установок. Дані дослідження підтверджують, що саме енергетичні обмеження залишаються одним із ключових факторів, що стримують підвищення автономності БпЛА.

Значної уваги набули дослідження ройових технологій, що передбачають використання груп БпЛА для спільного виконання завдань. У таких роботах аналізуються архітектури взаємодії між дронами, алгоритми вибору лідера, методи розподілу задач та способи забезпечення відмовостійкості системи [2–4]. Доведено, що ефективність ройового використання безпосередньо залежить від рівня автономності кожного окремого БпЛА та його здатності до самостійного прийняття рішень.

На сьогоднішній день залишаються невирішеними питання створення повністю автономних БпЛА п'ятого рівня, здатних функціонувати без участі людини в умовах невизначеності та динамічних змін середовища [5]. Також потребують подальшого дослідження питання підвищення надійності автономних систем, забезпечення кібербезпеки, зменшення енергоспоживання та підвищення ефективності взаємодії між БпЛА у складі рою.

Аналіз сучасних досліджень показує, що підвищення рівня автономності БпЛА є комплексною науково-технічною задачею, яка потребує поєднання досягнень у галузях навігації, сенсорних технологій, штучного інтелекту, енергетики та робототехніки. Водночас подальший розвиток даного напрямку потребує системного узагальнення існуючих підходів та формування нових методів підвищення автономності безпілотних авіаційних систем.

### **Мета дослідження**

Метою даної роботи є аналіз існуючих підходів до класифікації рівнів автономності безпілотних літальних апаратів, визначення їх ключових особливостей, а також дослідження сучасних технологічних рішень, що забезпечують підвищення автономності БпЛА. Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі основні завдання: аналіз рівнів автономності безпілотних систем; дослідження особливостей функціонування БпЛА залежно від рівня їх автономності; визначення ключових технологічних факторів, що впливають на автономність; формування перспективних напрямів розвитку автономних безпілотних систем.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Сучасний етап розвитку БпЛА характеризується поступовим переходом від дистанційно керованих систем до інтелектуальних автономних платформ, здатних виконувати складні завдання в умовах невизначеності. Одним із ключових критеріїв оцінювання технічної

досконалість безпілотних систем є рівень їх автономності, що визначається здатністю виконувати завдання без безпосереднього втручання оператора.

У науковій літературі відсутня єдина стандартизована система класифікації автономності саме для безпілотних літальних апаратів, тому на практиці часто використовується адаптована шкала з шести рівнів (від 0 до 5), що базується на аналогічних підходах до оцінювання автономності роботизованих транспортних систем. Концепція дозволяє систематизувати можливості БпЛА залежно від рівня автоматизації процесів навігації, прийняття рішень та взаємодії з навколишнім середовищем.

**Класифікація рівнів автономності БпЛА.** Сучасна класифікація автономності БпЛА базується на здатності системи виконувати цикл OODA (Observe-Orient-Decide-Act – спостереження-орієнтація-рішення-дія) без участі людини. Відповідно до стандартів ISO та SAE, адаптованих для авіаційних систем, виділяють шість ключових рівнів:

– рівень 0 (повна відсутність автоматизації). Оператор безпосередньо керує кожним сервоприводом або обертами двигунів. Будь-яка помилка пілота призводить до негайної зміни траєкторії;

– рівень 1 (асистування пілоту). Наявність гіростабілізації та систем утримання горизонту. Дрон здатний компенсувати вплив вітру, але курс і висота задаються оператором;

– рівень 2 (часткова автоматизація). Впровадження систем GPS-навігації. Дрон виконує політ за ключовими точками, підтримує задану висоту за допомогою барометра;

– рівень 3 (умовна автономність). Система здатна виявляти перешкоди за допомогою ультразвукових датчиків або простих стереокамер. При виявленні об'єкта дрон зупиняється і очікує рішення оператора;

– рівень 4 (висока автономність). БпЛА самостійно будує карту місцевості (SLAM), розраховує траєкторію обходу перешкод і здатний завершити місію навіть у разі втрати зв'язку з базовою станцією;

– рівень 5 (повна автономність). Інтелектуальна система, що самостійно визначає цілі місії на основі контексту (наприклад, пошук постраждалих у зоні лиха без попередньої карти).

Нульовий рівень автономності передбачає повну залежність БпЛА від оператора. У такому випадку всі функції, включаючи стабілізацію польоту, зміну траєкторії, контроль швидкості та висоти, виконуються людиною. Подібні системи мають мінімальну кількість автоматизованих функцій і використовуються переважно у навчальних цілях, спортивних змаганнях або як експериментальні платформи.

Перший рівень автономності характеризується появою базових допоміжних функцій, що полегшують керування. До них належать автоматичне утримання висоти, стабілізація положення у просторі, а також використання простих навігаційних модулів. Незважаючи на це, ключові рішення все ще приймаються оператором, а БпЛА виступає як інструмент дистанційного виконання команд.

Другий рівень автономності передбачає можливість виконання польоту за заздалегідь заданим маршрутом. У таких системах реалізуються функції автоматичного зльоту та посадки, польоту за координатами, а також базові алгоритми управління енергоспоживанням. Водночас реагування на непередбачувані перешкоди залишається задачею оператора. Такий рівень автономності є типовим для картографічних дронів, моніторингових систем та аграрних безпілотників.

Третій рівень автономності характеризується появою систем аналізу навколишнього середовища. БпЛА отримують можливість виявляти перешкоди за допомогою сенсорів або алгоритмів комп'ютерного зору, однак прийняття рішень щодо їх обходу часто потребує підтвердження оператора. Таким чином, формується концепція «контрольованої автономності», за якої дрон здатний діяти самостійно лише в межах визначених сценаріїв.

Четвертий рівень автономності передбачає здатність БпЛА самостійно аналізувати ситуацію, перебудовувати маршрут, уникати перешкод та виконувати поставлені задачі без

постійного контролю з боку людини. Оператор у такому випадку виконує функцію спостерігача або втручається лише у критичних ситуаціях. Саме цей рівень є найбільш актуальним для сучасних досліджень.

П'ятий рівень автономності розглядається як перспективний напрям розвитку. Він передбачає повну незалежність БПЛА від людини, здатність працювати в умовах невизначеності, адаптуватися до нових сценаріїв та самостійно формувати стратегії виконання завдань. Досягнення такого рівня можливе лише за умови інтеграції технологій штучного інтелекту, самоорганізованих систем та розвинених алгоритмів колективної поведінки.

**Особливості функціонування БПЛА різних рівнів автономності.** З підвищенням рівня автономності змінюється не лише програмне забезпечення безпілотних систем, але й вимоги до апаратної складової. Зокрема, зростає роль сенсорних систем, обчислювальних модулів та енергетичних ресурсів. Основні можливості БПЛА в залежності від їх рівня автономності демонструє рисунок 1.



Рис. 1. Схема розподілу можливостей БПЛА відповідно до рівня автономності

Основним фактором ефективності для БПЛА низьких рівнів автономності є якість каналу зв'язку з оператором. Надійність передачі сигналу визначає можливість виконання завдання та безпечність польоту. У випадку втрати зв'язку такі апарати часто втрачають керування або переходять у аварійний режим.

Найважливішим аспектом для БПЛА середніх рівнів автономності стає поєднання навігаційних систем. Найбільш поширеним рішенням є інтеграція супутникової навігації з інерціальними вимірювальними системами. Такий підхід дозволяє компенсувати недоліки кожної із технологій окремо та підвищити точність позиціонування [6].

Для високих рівнів автономності ключову роль відіграють алгоритми прийняття рішень. Вони повинні враховувати велику кількість параметрів: залишок енергії, пріоритет завдання, ризику, наявність альтернативних маршрутів та стан системи. У таких умовах традиційні алгоритми часто поступаються методам машинного навчання. Важливою характеристикою автономних БПЛА є швидкість обробки інформації. Система повинна не лише отримувати дані

із сенсорів, але й обробляти їх у режимі реального часу. Це формує вимоги до використання енергоефективних процесорів, спеціалізованих обчислювальних прискорювачів та оптимізованих алгоритмів.

**Технологічні основи підвищення автономності БпЛА.** Підвищення рівня автономності БпЛА можливе лише за умови комплексного розвитку трьох ключових напрямів: сенсорних технологій, обчислювальних алгоритмів та енергетичних систем.

До сенсорних технологій належать системи навігації, камери, лазерні далекоміри, радіолокаційні системи та мультиспектральні датчики. Їх використання дозволяє формувати цифрову модель навколишнього середовища та підвищувати ситуаційну обізнаність БпЛА.

Для досягнення 4-го рівня автономності критичним є розв'язання задачі локалізації. Математично стан дрона в просторі описується вектором стану:

$$X = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T \quad (1)$$

де  $(x, y, z)$  – координати, а  $(\varphi, \theta, \psi)$  – кути Ейлера (крен, тангаж, ролання).

Основним інструментом обробки даних від різнорідних сенсорів (IMU, GPS, LiDAR) є розширений фільтр Калмана (EKF) [7]. Алгоритм працює у два етапи:

- 1) прогноз: передбачення наступного стану на основі фізичної моделі руху;
- 2) корекція: оновлення стану на основі реальних вимірювань датчиків.

Використання EKF дозволяє мінімізувати середньоквадратичну помилку визначення координат, що є фундаментом для групового польоту, де точність позиціонування відносно сусідніх дронів має бути вищою за похибку GPS.

Особливу роль відіграють системи технічного зору. Використання методів глибокого навчання дозволяє виконувати розпізнавання об'єктів, класифікацію сцен, визначення траєкторій руху інших об'єктів та прогнозування потенційних ризиків.

Ще одним важливим напрямом є використання LiDAR систем, що дозволяють створювати тривимірні карти місцевості. Поєднання LiDAR та візуальних сенсорів забезпечує високу точність навігації навіть за відсутності GPS сигналу.

Важливим фактором автономності є енергетична незалежність. Час польоту безпосередньо визначає можливість виконання складних місій. Саме тому активно досліджуються нові типи акумуляторів, водневі паливні елементи та гібридні енергетичні системи.

Можна виділити основні напрями підвищення рівня автономності БпЛА:

- удосконалення сенсорних систем та підвищення їх точності;
- використання алгоритмів штучного інтелекту;
- розвиток енергетичних технологій;
- впровадження адаптивних систем управління;
- використання ройових технологій;
- підвищення надійності програмного забезпечення;
- створення самовідновлюваних систем;
- розвиток міжмашинної комунікації.

Важливим є також стандартизація протоколів обміну даними між БпЛА. Це дозволить створити універсальні платформи, здатні взаємодіяти незалежно від виробника.

**Проблема енергозабезпечення та її вплив на автономність БпЛА.** Одним із головних обмежень автономності БпЛА є обмежений запас енергії. Зі збільшенням кількості сенсорів та обчислювальних систем зростає споживання енергії, що зменшує тривалість польоту. Інженерний компроміс між масою, корисним навантаженням та дальністю польоту часто називають проблемою «паливо-вага-відстань». Вона полягає у необхідності досягнення балансу між цими параметрами.

Одним із шляхів вирішення цього завдання є використання легких композитних матеріалів, оптимізація конструкції та застосування енергоефективних двигунів. Значну роль також

відіграє оптимізація аеродинамічних характеристик. Інший напрям – використання альтернативних джерел енергії. Водневі паливні елементи дозволяють суттєво збільшити час польоту, а сонячні батареї відкривають можливості для надтривалих місій. Гібридні силові установки поєднують переваги різних типів двигунів та забезпечують підвищену надійність. У випадку відмови одного джерела енергії інше може забезпечити успішне виконання місії.

**Роль штучного інтелекту у підвищенні автономності.** Сучасні тенденції розвитку БпЛА нерозривно пов'язані з використанням штучного інтелекту. Саме інтелектуальні алгоритми дозволяють перейти від автоматизованих систем до по-справжньому автономних. Методи машинного навчання використовуються для навігації, розпізнавання об'єктів, планування маршрутів та оптимізації використання ресурсів. Особливо важливими є нейронні мережі, здатні працювати з великими обсягами неструктурованих даних. Окрему категорію становлять алгоритми підкріплювального навчання, які дозволяють БпЛА навчатися на основі власного досвіду. Такий підхід дозволяє створення систем, що адаптуються до нових умов без перепрограмування.

Важливою проблемою залишається забезпечення надійності рішень, прийнятих штучним інтелектом. Для цього використовують методи пояснюваного штучного інтелекту, резервування алгоритмів та багаторівневі системи перевірки рішень.

**Ройове використання БпЛА як фактор підвищення ефективності застосування.** Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку є використання груп БпЛА, що взаємодіють між собою. Ройові системи дозволяють виконувати задачі, які неможливо реалізувати одним апаратом. Основними перевагами ройового підходу є масштабованість, відмовостійкість та можливість паралельного виконання завдань. Втрата одного елемента рою не призводить до провалу всієї місії.

Архітектури рою можуть бути централізованими, децентралізованими або гібридними [4]. У централізованих системах управління здійснюється одним вузлом, у децентралізованих – рішення приймаються колективно. Алгоритми колективної поведінки часто базуються на біологічних аналогах: поведінці мурашок, бджіл, риб або птахів. Такі алгоритми демонструють високу ефективність при мінімальних вимогах до обчислювальних ресурсів.

**Перспективні шляхи підвищення рівня автономності БпЛА.** Сучасний розвиток безпілотних систем характеризується активним впровадженням новітніх технологій штучного інтелекту, розподілених обчислень, мультисенсорної інтеграції та колективної взаємодії. Особливістю досліджень світової наукової спільноти 2025–2026 років є перехід від класичних алгоритмів автоматичного керування до когнітивних автономних систем, здатних до самонавчання, адаптації та колективного прийняття рішень. Основні перспективні напрями підвищення автономності БпЛА сьогодні формуються навколо п'яти ключових технологічних підходів.

1. Використання великих мовних моделей для автономного програмування поведінки БпЛА. Одним із найновіших напрямів розвитку автономних безпілотних систем є інтеграція великих мовних моделей (Large Language Models – LLM) у контури управління БпЛА. Дослідження демонструють можливість використання генеративного штучного інтелекту для автоматичного формування програм польоту та логіки поведінки дронів. Запропоновано нову концепцію автономії БпЛА, що передбачає використання структурованих запитів до мовних моделей для автоматичного генерування програм управління польотом [8]. Такий підхід дозволяє формалізувати правила польоту, обмеження середовища та параметри місії у вигляді контексту для AI-системи, яка генерує оптимальні алгоритми виконання задач.

Основними перевагами технології є:

- можливість швидкого формування нових сценаріїв польоту;
- адаптація поведінки БпЛА без перепрограмування;
- автоматичне врахування обмежень середовища;
- зменшення часу підготовки місії.

Перспективним напрямом розвитку є створення повністю когнітивних безпілотних систем, здатних інтерпретувати задачі, сформульовані природною мовою, та самостійно формувати план їх виконання.

2. Vision-Language Navigation (VLN) – навігація на основі поєднання комп'ютерного зору та семантичного аналізу. Іншим новітнім напрямом, що активно розвивається з 2025 року, є інтеграція комп'ютерного зору та мовних моделей у єдині системи навігації. Концепція дозволяє БПЛА не лише аналізувати зображення, але й інтерпретувати семантичні команди.

Дослідження показують, що такі системи можуть виконувати навігацію на основі текстових інструкцій, поєднуючи аналіз візуальної сцени з логічною інтерпретацією задачі [9]. Це дозволяє безпілотнику орієнтуватися у нових середовищах без попереднього програмування маршруту.

Основні переваги цієї технології:

- можливість виконання задач у невідомому середовищі;
- підвищення рівня ситуаційної обізнаності;
- формування контекстно-залежної поведінки;
- зменшення залежності від GPS.

Очікується, що розвиток таких технологій дозволить створити універсальні автономні платформи, здатні виконувати складні місії на основі високорівневих команд.

3. Cloud-Edge-End архітектури автономності. Однією з ключових технологічних проблем автономних БПЛА є обмеженість обчислювальних ресурсів на борту. Дослідження 2025 року пропонують вирішення цієї проблеми через використання розподілених обчислювальних архітектур типу «cloud-edge-end». Такий підхід передбачає розподіл задач між бортовими процесорами, периферійними серверами та хмарною інфраструктурою. Це дозволяє використовувати складні моделі для аналізу середовища без перевантаження бортових систем.

Запропоновані рішення включають:

- адаптивний розподіл обчислень;
- використання глибоких нейронних мереж для аналізу середовища;
- динамічне планування маршрутів;
- використання навчання з підкріпленням для адаптації.

Використання такої архітектури дозволяє збільшити дальність автономного польоту приблизно на 40 % за рахунок оптимізації навігації та обчислювальних процесів [2]. У перспективі це може привести до створення мережових автономних БПЛА, які будуть функціонувати як елементи єдиної інтелектуальної системи.

4. Алгоритми підкріплювального навчання нового покоління для самостійної навігації. Навчання з підкріпленням (Reinforcement learning – RL) залишається одним із найбільш перспективних напрямів підвищення автономності БПЛА. У новітніх дослідженнях 2025 року RL використовується для формування поведінкових моделей БПЛА на основі досвіду взаємодії із середовищем. Ці алгоритми дозволяють БПЛА самостійно навчатися ефективній навігації між заданими точками з урахуванням ризиків зіткнення та енергоспоживання [10].

Перевагами цього підходу є:

- здатність до самонавчання;
- адаптація до змін середовища;
- оптимізація траєкторій;
- зменшення ризику зіткнень;
- формування оптимальної поведінки без явного програмування.

Особливо перспективним є поєднання RL із цифровими двійниками, що дозволяє навчати БПЛА у симуляційному середовищі до реального застосування.

5. Інтелектуальні ройові системи нового покоління. Одним із найважливіших напрямів розвитку автономності БПЛА у 2025–2026 роках є створення інтелектуальних ройових систем,

що дозволяють групам дронів діяти як єдиний адаптивний організм. Новітні демонстрації показують можливість автономної координації сотень БПЛА, які здатні виконувати задачі навіть у випадку втрати зв'язку з оператором [3].

Ключовими характеристиками таких систем є:

- децентралізоване прийняття рішень;
- самовідновлення структури рою;
- адаптивний розподіл задач;
- колективне планування маршрутів;
- відмовостійкість.

Додатковим підтвердженням розвитку цього напрямку є створення нових автономних платформ, здатних до колективної взаємодії та автономного виконання складних місій із використанням штучного інтелекту [1].

Комплексне поєднання п'яти розглянутих вище новітніх технологічних рішень вірогідно дозволить у найближчі роки перейти до створення повністю автономних безпілотних авіаційних систем нового покоління, здатних діяти без втручання людини у складних динамічних середовищах.

### Висновки

Підвищення рівня автономності БПЛА безпосередньо пов'язане з розвитком методів автономного прийняття рішень, здатністю систем до адаптації в реальному часі та можливістю функціонування в умовах обмеженої зовнішньої навігаційної підтримки.

Ключовим напрямком розвитку сучасних безпілотних систем є перехід від автоматизованих до когнітивних автономних платформ, здатних до аналізу середовища, прогнозування змін обстановки та оптимізації власної поведінки. Найбільш перспективними технологічними рішеннями є використання штучного інтелекту, мультисенсорної інтеграції, розподілених обчислювальних систем та алгоритмів колективної взаємодії.

Подальше підвищення автономності БПЛА потребує комплексного вдосконалення апаратної та програмної складових, зокрема підвищення енергоефективності, надійності обробки даних та стійкості автономних алгоритмів до відмов і зовнішніх впливів.

Перспективи подальших досліджень доцільно спрямувати на розроблення універсальних архітектур автономного управління, підвищення рівня інтелектуалізації безпілотних систем, розвиток методів колективного прийняття рішень та створення адаптивних систем, здатних до самонавчання в процесі експлуатації.

### Список використаної літератури

1. Munjal G., Yadav P., Haque A. Advancing Autonomous Drone Systems: The Synergy of AI and Data Science in Enhancing Drone Capabilities and Applications. *Edge Computing and Aerial Platforms*. 2026. pp. 37–61. DOI: 10.1002/9781394336326.ch2
2. Azzouni A., Pujolle G. Autonomous Drone Swarms Using Lightweight LLMs. *Proceedings of 1st GENZERO Workshop*. Springer, Singapore. 2026. pp. 21–31. [https://doi.org/10.1007/978-981-95-1050-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-95-1050-4_3)
3. Cui L., Zhou K., Wang J., Du Z., Jiang C., Qin H. Research on UAV swarm inspection path and defect identification based on LLM multi-agent collaborative optimization. *Microchemical Journal*. 2025. Vol. 219. 115838. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.115838>
4. Довбиш І. О., Муравйов О. В. Залежність алгоритму вибору лідера рою від рівня автономності БПЛА. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34 (73). № 6. С. 84–90. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/13>
5. Ran F., Yu C., Xu E., Feng Y. Autonomous UAV Path Planning in Dynamic Environments: A Hybrid Framework of Trajectory Prediction and Priority-Aware DWA. *IEEE 19th International*

- Conference on Control & Automation (ICCA)*. Tallinn, Estonia. 2025. pp. 150–155. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCA65672.2025.11129782>
6. Dovbysh I. O., Muraviov O. V., Momot A. S., Bohdan H. A. Autonomous UAV navigation: technologies for orientation and localization. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2025. Том. 8. № 1. С. 57–64. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-5>
  7. Dovbysh I. O., Muraviov O. V. Complementary filter for UAV attitude estimation. *Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні: XX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених: збірник праць конференції*, Київ, 04-05 грудня 2024 р., КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ. С. 295–298.
  8. Hu Y., Zhou Y., Zhu Z., Yang X., Zhang H., Bian K., Han H. LLVM-drone: A synergistic framework integrating large language models and vision models for visual tasks in unmanned aerial vehicles. *Knowledge-Based Systems*. 2025. Vol. 327. 114190. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.114190>
  9. Saxena P., Raghuvanshi N., Goveas N. UAV-VLN: End-to-End Vision Language guided Navigation for UAVs. *Proc. European Conference on Mobile Robots (ECMR)*. 2025. pp. 1–6. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.21432>
  10. Wu J., Ye Y., Du J. Multi-objective reinforcement learning for autonomous drone navigation in urban areas with wind zones. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 158. 105253. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105253>

#### References

1. Munjal, G., Yadav, P., & Haque, A. (2026). Advancing Autonomous Drone Systems: The Synergy of AI and Data Science in Enhancing Drone Capabilities and Applications. *Edge Computing and Aerial Platforms*, 37–61. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781394336326.ch2> [in English].
2. Azzouni, A., & Pujolle, G. (2026). Autonomous Drone Swarms Using Lightweight LLMs. *Proceedings of 1st GENZERO Workshop*, Springer, Singapore. 21–31. [https://doi.org/10.1007/978-981-95-1050-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-95-1050-4_3) [in English].
3. Cui, L., Zhou, K., Wang, J., Du, Z., Jiang, C., & Qin, H. (2025). Research on UAV swarm inspection path and defect identification based on LLM multi-agent collaborative optimization. *Microchemical Journal*, 219. 115838. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.115838> [in English].
4. Dovbysh, I. O., & Muraviov, O. V. (2023). Zalezhnist alhorytmu vyboru lidera roiu vid rivnia avtonomnosti BpLA [The swarm leader election algorithm dependence of the UAVs autonomy level]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky*, 34 (73). 6. 84–90. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/13> [in Ukrainian].
5. Ran, F., Yu, C., Xu, E., & Feng, Y. (2025). Autonomous UAV Path Planning in Dynamic Environments: A Hybrid Framework of Trajectory Prediction and Priority-Aware DWA. *IEEE 19th International Conference on Control & Automation (ICCA)*, Tallinn, Estonia, 150–155. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCA65672.2025.11129782> [in English].
6. Dovbysh, I. O., Muraviov, O. V., Momot, A. S., & Bohdan, H. A. (2025). Autonomous UAV navigation: technologies for orientation and localization. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuвання*, 8 (1). 57–64. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-5> [in English].
7. Dovbysh, I. O., & Muraviov, O. V. (2024). Complementary filter for UAV attitude estimation. *Efektivnist ta avtomatyzatsiia inzhenernykh rishen u pryladobuduvanni: XX Vseukrainska nauково-praktychna konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh* [Efficiency and automation of engineering solutions in instrumentation: XX All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Kyiv [in English].

8. Hu, Y., Zhou, Y., Zhu, Z., Yang, X., Zhang, H., Bian, K., & Han, H. (2025). LLVM-drone: A synergistic framework integrating large language models and vision models for visual tasks in unmanned aerial vehicles. *Knowledge-Based Systems*, 327. 114190. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.114190> [in English].
9. Saxena, P., Raghuvanshi, N., & Goveas, N. (2025). UAV-VLN: End-to-End Vision Language guided Navigation for UAVs. *Proc. European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, 1–6. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.21432> [in English].
10. Wu, J., Ye, Y., & Du, J. (2024). Multi-objective reinforcement learning for autonomous drone navigation in urban areas with wind zones. *Automation in Construction*, 158. 105253. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105253> [in English].

Муравйов Олександр Володимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: [stals98@ukr.net](mailto:stals98@ukr.net), ORCID: 0000-0002-7699-0245.

Muraviyov Oleksandr Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation and Non-Destructive Testing Systems of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. E-mail: [stals98@ukr.net](mailto:stals98@ukr.net), ORCID: 0000-0002-7699-0245.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)