

Д. О. БОРОВИК

аспірант кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0009-0005-3642-9444

М. О. ЗАРЕЦЬКИЙ

доктор філософії,
старший викладач кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0001-9117-5604

ВИКОРИСТАННЯ ДРОНІВ ТА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У ВІЙСЬКОВІЙ СТРАТЕГІЇ УКРАЇНИ

Досліджено технічні аспекти застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у Збройних Силах України (ЗСУ) для виконання завдань розвідки, ударних операцій, логістики та радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Мета статті – проаналізувати технічні характеристики, функціональність і програмне забезпечення (ПЗ) українських безпілотних апаратів, оцінити ефективність їхнього використання без інтегрованого штучного інтелекту (ШІ) та визначити перспективи часткової або повної автоматизації для підвищення автономності в умовах реальних бойових дій.

Результати свідчать, що попри ефективність дронів у базових завданнях, їхня робота ускладнюється порушенням зв'язку, зниженням автономності на 20–30 % через кліматичні фактори та обмеженою гнучкістю ПЗ. Розвідувальні дрони забезпечують спостереження, ударні – точкове ураження цілей, логістичні – оперативну доставку вантажів, а РЕБ-безпілотні апарати – блокування ворожих каналів зв'язку. Водночас ПЗ не передбачає автономної навігації, корекції маршрутів або адаптації до змін у бойовому середовищі. Просте ПЗ не дає змоги безпілотним апаратам функціонувати без постійного керування оператором, що знижує їхню ефективність у зонах активного РЕБ. Розглянуто переваги та обмеження ключових моделей БПЛА, зокрема «Лелека-100», «Rasoon», «Vukovel», які становлять основу тактичного арсеналу. Проаналізовано можливості їхнього програмного забезпечення (ПЗ) та апаратної платформи в умовах активного впливу ворожих РЕБ-систем і складних кліматичних умов. Акцент зроблено на практичних бар'єрах автоматизації, пов'язаних із енергоспоживанням, вагою дронів і недостатньою обчислювальною потужністю, а також на шляхах поступового впровадження елементів штучного інтелекту (ШІ) через модульні рішення.

Ефективність БПЛА ЗСУ значною мірою залежить від вдосконалення їхніх технічних характеристик і ПЗ. Перспективними напрямками є впровадження інерційних навігаційних систем, гібридних джерел живлення, адаптивного ПЗ для РЕБ-дронів та локальної обробки даних за допомогою спрощених ШІ-алгоритмів. Поступове впровадження таких рішень дозволить підвищити автономність і надійність дронів без значного напруження ресурсної бази.

Ключові слова: дрони, штучний інтелект, програмне забезпечення, РЕБ, автономність.

D. O. BOROVYK

Postgraduate Student at the Department of Computer Science
Sumy State University
ORCID: 0009-0005-3642-9444

M. O. ZARETSKYI

Doctor of Philosophy,
Senior Lecturer at the Department of Computer Science
Sumy State University
ORCID: 0000-0001-9117-5604

THE USE OF DRONES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN UKRAINE'S MILITARY STRATEGY

The article examines the technical aspects of the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the Armed Forces of Ukraine (AFU) to perform reconnaissance, strike operations, logistics, and electronic warfare (EW) tasks.

The purpose of the article is to analyze the technical characteristics, functionality, and software of Ukrainian drones, to assess the effectiveness of their use without integrated Artificial Intelligent (AI), and to determine the prospects for partial automation to increase autonomy in real-world combat.

© Боровик Д. О., Зарецький М. О., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

The results show that despite the effectiveness of drones in basic tasks, their work is complicated by communication disruptions, a 20–30 % decrease in autonomy due to climatic factors, and limited software flexibility. Reconnaissance drones provide surveillance, strike drones provide targeted destruction, logistics drones provide rapid delivery of goods, and electronic warfare drones block enemy communication channels. However, the software does not provide for autonomous navigation, route correction, or adaptation to changes in the combat environment. Simple software does not allow drones to function without constant operator control, which reduces their effectiveness in areas of active electronic warfare. The advantages and limitations of key models of drones Leleka-100, Racoon, Bukovel, which form the basis of the tactical arsenal, are considered. The author analyzes the capabilities of their software and hardware platforms in the face of active influence of enemy electronic warfare systems and difficult climatic conditions. The emphasis is placed on the practical barriers to automation related to power consumption, weight of drones, and insufficient computing power, as well as on ways to gradually introduce elements of AI through modular solutions.

The effectiveness of the UAVs of the Armed Forces of Ukraine largely depends on improving their technical characteristics and software. Promising areas include the introduction of inertial navigation systems, hybrid power sources, adaptive software for electronic warfare drones, and local data processing using simplified AI algorithms. The gradual introduction of such solutions will increase the autonomy and reliability of drones without a significant increase in the resource base.

Key words: *drones, artificial intelligence, software, EPR, autonomy, unmanned aerial vehicle.*

Постановка проблеми

Безпілотні літальні апарати відіграють важливу роль у сучасній військовій стратегії України, виконуючи завдання з аеророзвідки, цілевказання, логістики та радіоелектронної боротьби. Втім, попри їхню ефективність, існує низка системних технічних обмежень, які стримують потенціал дронів у бойових умовах.

По-перше, ключовою проблемою залишається обмежена автономність польоту. Наявні моделі дронів мають низьку енергоефективність, що обмежує тривалість їх роботи та унеможливорює використання потужного обчислювального обладнання. Акумулятори швидко втрачають заряд при низьких температурах або під час експлуатації енергоємних модулів – наприклад, гіростабілізованих камер або багатоканальних передавачів.

По-друге, дрони критично залежні від супутникової навігації. Умови активної РЕБ часто призводять до втрати GPS-сигналу, що паралізує керування та виконання завдань. Альтернативні системи – як-от інерційна навігація – не впроваджуються масово через вагові обмеження, високу похибку недорогих модулів та необхідність постійного калібрування.

По-третє, більшість БПЛА позбавлені реального «інтелекту» на борту. Типове програмне забезпечення базується на фіксованих маршрутах і ручному управлінні, що не дозволяє дрону адаптуватися до змін у реальному часі. Вся обробка відеосигналу відбувається на землі, що призводить до затримок у прийнятті рішень, інформаційного перевантаження операторів і зниження бойової ефективності.

По-четверте, відсутність гнучкого ПЗ обмежує роботу дронів у змінному частотному середовищі. Наприклад, дрони для РЕБ не можуть автоматично сканувати спектр і адаптувати глушіння до нових частот. Розвідувальні та ударні БПЛА зазвичай не мають резервних каналів зв'язку чи алгоритмів зниження залежності від центрального керування.

По-п'яте, конструктивні обмеження стримують інтеграцію сучасного ШІ. Дрони вагою до 10 кг не здатні нести повноцінні процесори або енергоємну пам'ять, необхідну для складних алгоритмів машинного навчання. Це виключає застосування onboard AI, що міг би забезпечити автономну класифікацію об'єктів, ухвалення рішень і адаптацію до ситуації.

Отже, технічна суть проблеми полягає у необхідності комплексної модернізації апаратного і програмного забезпечення БПЛА. Така модернізація має враховувати можливість автономної роботи у складних умовах – за відсутності зв'язку, під дією РЕБ, у складному рельєфі – без критичного збільшення маси або споживання енергії. Подальший розвиток систем повинен орієнтуватися на впровадження легковагових, енергоефективних мікропроцесорів, адаптивного ПЗ з елементами штучного інтелекту та альтернативних навігаційних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні дослідження у сфері військового застосування БПЛА фокусуються переважно на їх класифікації, аналізі тактико-технічних характеристик, функціональності програмного забезпечення та можливостях використання ШІ у бойових умовах. При цьому основна увага зосереджена на традиційних параметрах, таких як дальність польоту, вантажність, точність ураження, залишаючи поза належною увагою аспекти програмної автономії, обробки даних на борту та адаптивності систем керування.

Дослідники відзначають, що інтеграція ШІ в системи управління БПЛА відкриває можливості для автоматизації прийняття рішень та аналізу даних у реальному часі. Однак, як підкреслюється у роботах Литвиненка М. І. та ін., ключовим обмеженням залишається недостатня обчислювальна потужність апаратних модулів, особливо у легких БПЛА, типу «Лелека-100», де критично важлива енергоефективність [1].

Іншою перешкодою є залежність автономної навігації від стабільного каналу зв'язку. Зокрема, Joshi A. та ін. акцентують на тому, що в умовах дії ворожих систем радіоелектронної боротьби (РЕБ) порушення зв'язку призводить до втрати керованості та недосягнення місії [2]. Попри перспективність технологій 5G, як зазначають Dash B. та колеги, стабільність передачі даних у зоні бойових дій залишається недостатньою, а відсутність автономної обробки інформації знижує боєздатність апаратів [3].

Науковці також систематизують типи дронів, що використовуються ЗСУ. Ivanchenko O. та співавтори наводять технічні характеристики дронів: дальність польоту до 50 км, точність ударів до 80 %, радіус дії РЕБ-модулів – до 50 км [4]. Проте, акцент здебільшого зроблено на апаратному забезпеченні, тоді як проблеми обмеженої функціональності ПЗ, відсутності адаптивності та автономності залишаються поза увагою.

Варто відзначити, що навіть багатоцільові моделі, як-от логістичні БПЛА типу «Valkyrie», наразі не здатні адаптувати маршрути залежно від змін бойової обстановки. Це свідчить про відсутність на борту систем ситуаційної обізнаності та гнучких алгоритмів маршрутизації [6].

Окремі дослідники, як Sorochkin O. та ін., розглядають ШІ як можливий інструмент для підтримки автономної навігації у випадку втрати зв'язку з оператором, особливо для ударних моделей БПЛА. Цей підхід дозволив би частково компенсувати дію РЕБ-засобів супротивника [7].

Актуальним напрямом є також ройові технології, де група дронів діє як єдина синхронізована система. Радованович М. та колеги підкреслюють, що реалізація такої архітектури потребує високопродуктивної обчислювальної інфраструктури та ПЗ з високим рівнем координації – компонентів, які наразі відсутні в українських зразках техніки [8].

У контексті обробки відеопотоків, Трофименко О. та ін. вказують на потенціал алгоритмів комп'ютерного зору для автоматизованої розвідки. Водночас дослідники зауважують, що ці алгоритми мають бути максимально спрощеними через обмеження ресурсів на борту БПЛА [9].

Гуржій С. В. підсумовує, що ключовими факторами підвищення ефективності БПЛА є не лише їх технічні характеристики, а й здатність ПЗ до адаптації в умовах невизначеності. Саме ця здатність наразі не відповідає актуальним потребам Збройних Сил України [10].

Таким чином, попри наявність значного масиву публікацій, більшість досліджень зосереджуються на конвенційних параметрах дронів, залишаючи недооціненими проміжні рішення в галузі автоматизації – часткову автономність, локальну обробку даних, адаптивне програмне забезпечення. Саме ці напрями потребують поглибленої розробки з урахуванням реальних обмежень апаратної бази українських БПЛА.

Формулювання мети дослідження

Мета статті: комплексний аналіз видів безпілотних літальних апаратів, які використовуються Збройними Силами України. Особлива увага приділяється технічним характеристикам, можливостям програмного забезпечення, а також потенціалу застосування інтелектуальних технологій для підвищення ефективності виконання завдань в умовах протидії засобам радіоелектронної боротьби.

Викладення основного матеріалу дослідження

Безпілотні літальні апарати формують основу сучасної військової стратегії Збройних Сил України, виконуючи завдання розвідки, ударних операцій, логістики та радіоелектронної боротьби. Завдяки компактним розмірам і модульній конструкції вони оперативнo реагують на зміни бойового середовища, перевершуючи важку техніку в маневреній війні. Литвиненко М. І. та ін. підкреслюють, що впровадження алгоритмів комп'ютерного зору значно прискорює ідентифікацію цілей, але сучасні мікропроцесори дронів не забезпечують необхідної обчислювальної потужності [1, с. 16]. Основними обмеженнями залишаються чутливість до радіоелектронних перешкод, недостатня тривалість польоту та слабка адаптивність програмного забезпечення до динамічних умов.

Розвідувальні дрони, такі як «Лелека-100», відіграють вирішальну роль у зборі розвідданих і коригуванні артилерійського вогню на дистанціях до 50 км. Оснащені електрооптичними камерами з роздільною здатністю 1920 × 1080 пікселів і тепловізорами з чутливістю 50 мілікельвінів, вони виявляють об'єкти в темряві та за складних погодних умов. Terzić M. зазначає, що «Лелека-100» точно визначає координати скупчень техніки на відстані 40 км, забезпечуючи артилерійські удари в реальному часі [5, с. 365]. Камера з 10-кратним оптичним збільшенням фіксує об'єкти розміром від 1 метра, а зашифрований канал зв'язку на частоті 2,4 ГГц передає дані з похибкою до 10 метрів. Однак ручна обробка відеопотоку оператором спричиняє затримки до 8 секунд, перевантажуючи наземні станції керування [2, с. 140]. Електричний двигун потужністю 600 ват забезпечує до 6 годин польоту, але літій-полімерний акумулятор ємністю 16 ампер-годин втрачає до 25 % ефективності за температур нижче –10 °С, що ускладнює зимові операції.

Ударні дрони, зокрема FPV-модель «Raccoon», призначені для високоточного знищення ворожих укріплень і техніки. З масою 2 кг і максимальною швидкістю 180 км/год вони доставляють вибухові заряди до 0,5 кг із точністю ураження 1 метр за стабільного зв'язку. Камера з кутом огляду 120 градусів і частотою 60 кадрів за секунду забезпечує чітке зображення навіть під час швидкісного польоту. Sorochkin O. та ін. вказують, що відсутність автоматичного розпізнавання цілей змушує операторів покладатися на аналоговий відеоканал із частотою

5,8 ГГц, який блокується РЕБ-системами на відстані 12 км, а затримка сигналу 0,12 секунди знижує ефективність у зонах активних бойових дій [7, с. 217]. Інерційні навігаційні модулі на базі мікроелектромеханічних систем могли б компенсувати втрату зв'язку, але їхня похибка 0,1 м/с² обмежує точність при тривалій автономній роботі [7, с. 218], рис. 1.

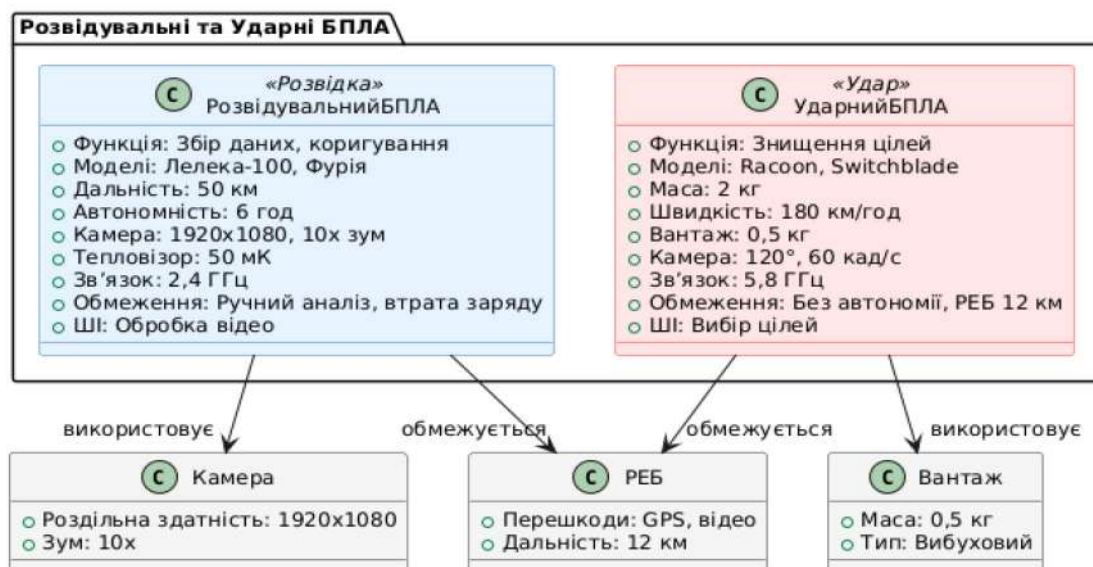


Рис. 1. Аналіз розвідувальних і ударних БПЛА

Джерело: авторська розробка в PlantUML Online Editor

Логістичні дрони, наприклад «Valkyrie», забезпечують швидке транспортування вантажів масою до 20 кг на відстань 30 км за 25 хвилин. Квадрокоптер із чотирма роторами загальною потужністю 3200 ват зберігає стабільність при поривах вітру до 12 м/с. Dash V. та ін. наголошують, що нестабільність 5G-зв'язку з пропускнуною здатністю 8 мегабіт за секунду ускладнює передачу телеметрії в реальному часі, а програмне забезпечення не враховує динамічні перешкоди, такі як РЕБ чи зміна погоди [3, с. 314]. Літій-іонний акумулятор ємністю 12 ампер-годин підтримує до 2 годин польоту. Алгоритми планування траєкторій, такі як Rapidly-exploring Random Tree, могли б оптимізувати маршрути, але мікроконтролер із частотою 150 МГц і пам'яттю 256 КБ не забезпечує необхідної продуктивності, рис. 2.



Рис. 2. Аналіз логістичних БПЛА

Джерело: авторська розробка в PlantUML Online Editor

Дрони радіоелектронної боротьби, такі як «Піранья», створюють перешкоди в діапазоні частот 300–3000 МГц на відстані до 50 км, придушуючи ворожі системи зв'язку та навігації. З масою 10 кг і спрямованим передавачем потужністю 50 ват вони ефективно глушать GPS і радіоканали за допомогою антени з кутом випромінювання 30 градусів. Літій-полімерний акумулятор ємністю 20 ампер-годин забезпечує 4 години роботи. Sorochkin O. та ін. зазначають, що ручне налаштування частот, яке триває до 90 секунд, знижує оперативність реагування на сучасні адаптивні РЕБ-системи через відсутність автоматичного сканування спектру [7, с. 219]. Оновлення 2024 року розширило частотний діапазон, але обмеження пам'яті мікроконтролера до 512 КБ унеможливило обробку великих масивів даних у реальному часі, рис. 3.



Рис. 3. Аналіз РЕБ та Дорозвідка БПЛА

Джерело: авторська розробка в PlantUML Online Editor

Апаратне забезпечення дронів створює значні бар'єри для впровадження передових технологій. Легкі моделі масою 5–10 кг оснащені мікроконтролерами з частотою до 200 МГц і оперативною пам'яттю 512 КБ, що не дозволяє виконувати складні обчислення, такі як обробка відеопотоку чи нейронних мереж. Criollo L. та ін. підкреслюють, що потужніші процесори, наприклад NVIDIA Jetson Nano з продуктивністю 0,5 терафлопс, споживають 15 ват, скорочуючи автономність на 25 % і додаючи 300 г ваги, що порушує аеродинамічний баланс [6, с. 117–118]. Joshi A. та ін. зазначають, що літій-іонні акумулятори втрачають до 30 % ємності при температурах нижче -15°C , а РЕБ-системи, генеруючи імпульси на частоті 1,5 ГГц, виводять із ладу GPS-навігацію за 5–10 секунд [2, с. 140–141]. Інерційні системи на основі акселерометрів і гіроскопів мають похибку $0,05 \text{ м/с}^2$, що накопичується до 50 метрів за 10 хвилин, роблячи їх непридатними для тривалих автономних місій.

Штучний інтелект відкриває можливості для автономних операцій дронів (рис. 4–8). Нейронна мережа YOLOv8 здатна ідентифікувати ворожу техніку з точністю 92 % на відстані 35 км навіть у зонах РЕБ, але вимагає процесора з продуктивністю 2 терафлопс і споживанням 20 ват, що є недосяжним для легких дронів. Литвиненко М. І. та ін. пропонують легші алгоритми, такі як Нааг-каскади, які виявляють рухомі об'єкти з точністю 75 %, використовуючи 50 МБ пам'яті та 2 вати енергії, зменшуючи обсяг переданих даних до 5 мегабіт за секунду [1, с. 16]. Трофименко О. та ін. попереджають, що ці алгоритми втрачають до 50 % точності через шуми, спричинені РЕБ на частоті 5,8 ГГц [9, с. 168]. Sorochkin O. та ін. описують концепцію дорозвідки, де дрон із модулем MobileNet аналізує теплові сигнатури на відстані 30 км, передаючи лише координати цілей, що знижує залежність від зв'язку до 1 мегабіта за секунду, але потребує процесора з продуктивністю 0,8 терафлопс [7, с. 218].

Ройові технології дозволяють координувати групи дронів для виконання складних завдань, таких як створення тривимірних карт бойового простору. Radovanović M. та ін. зазначають, що вісім дронів із mesh-мережею на частоті 2,4 ГГц можуть сканувати територію площею 80 км^2 , обмінюючись даними через протокол ZigBee із пропускну здатністю 250 кілобіт за секунду [8, с. 58]. РЕБ-системи скорочують дальність зв'язку до 1,5 км, а мікроконтролери з частотою 200 МГц не здатні синхронізувати більше трьох апаратів. Модульна координація двох дронів для розвідки та удару є більш досяжною, використовуючи послідовний інтерфейс зі швидкістю 115 200 біт за секунду. Енергоспоживання залишається критичним обмеженням. Joshi A. та ін. пропонують літій-сірчані акумулятори з енергоємністю 300 ват-годин/кг, які подовжують політ до 7 годин, але втрачають 20 % ефективності при

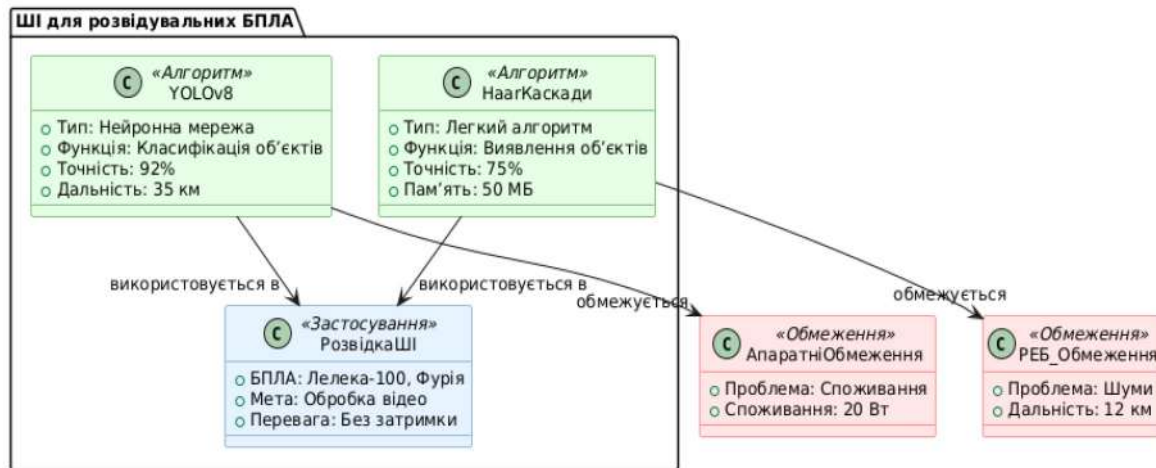


Рис. 4. ШІ для розвідувальних БПЛА

Джерело: авторська розробка в PlantUML Online Editor

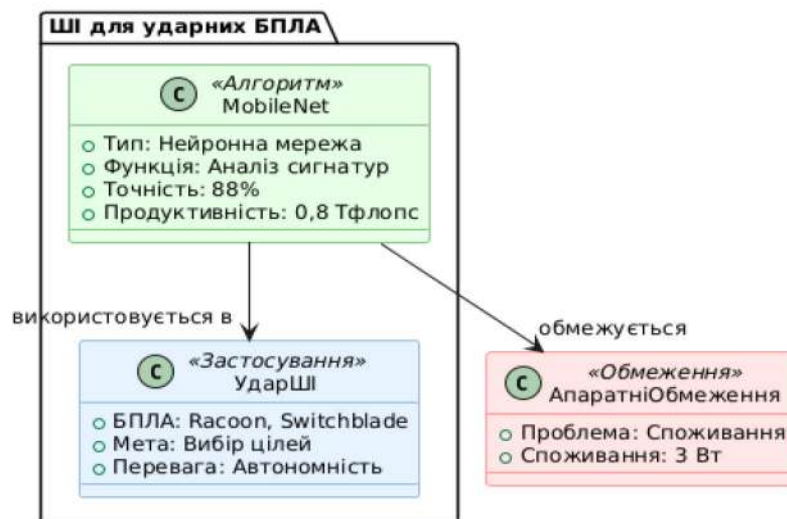


Рис. 5. ШІ для ударних БПЛА

Джерело: авторська розробка в PlantUML Online Editor

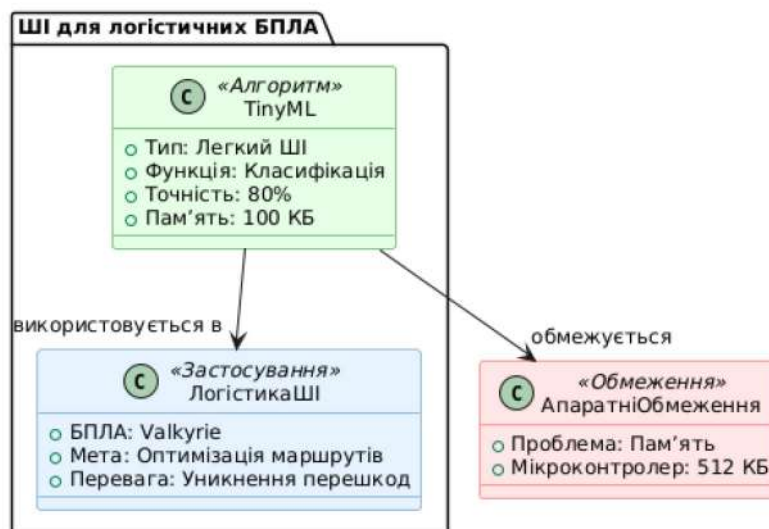


Рис. 6. ШІ для логістичних БПЛА

Джерело: авторська розробка в PlantUML Online Editor



Рис. 7. ШІ для РЕБ БПЛА

Джерело: авторська розробка в PlantUML Online Editor

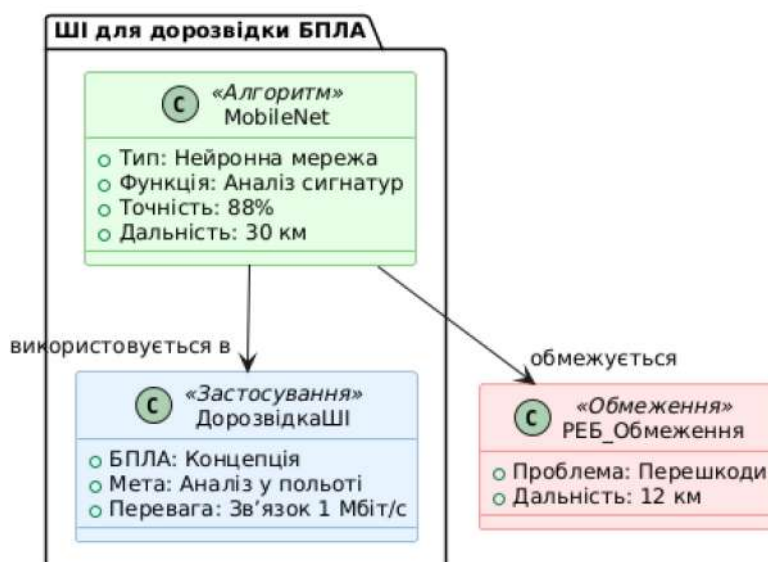


Рис. 8. ШІ для дорозвідки БПЛА

Джерело: авторська розробка в PlantUML Online Editor

–20 °C [2, с. 141]. Зашифровані канали з алгоритмом AES-256 на частоті 900 МГц захищають від перехоплення, але споживають додаткові 3 вати, скорочуючи автономність на 10 %.

Погодні умови суттєво впливають на ефективність дронів. Сильний вітер швидкістю 18 м/с відхиляє траєкторію на 10 метрів за хвилину, а дощ інтенсивністю 5 мм/год накопичує вологу на лінзах камер, погіршуючи видимість. Низькі температури знижують продуктивність мікроконтролерів на 15 % при –15 °C. Criollo L. та ін. зазначають, що гібридні двигуни, які поєднують електричну енергію з мікротурбінами, забезпечують стабільну роботу при –25 °C, але їхня маса 1,2 кг обмежує вантажопідйомність легких моделей [6, с. 118]. Гідрофобні покриття для камер і теплові ізолятори для акумуляторів зменшують вплив погоди, але додають 150 г ваги.

Розвідувальні дрони, такі як «Лелека-100» і «Фурія», забезпечують спостереження на відстані до 50 км з автономністю до 6 годин, але ручний аналіз відеопотоку спричиняє затримки в обробці даних. Ударні дрони, зокрема «Rasoon» і «Switchblade», демонструють точність ураження 80 % за стабільного зв'язку, але не мають алгоритмів автономного наведення. Логістичні дрони, такі як «Valkyrie», доставляють вантажі до 20 кг, але не адаптуються до динамічних перешкод. РЕБ-дрони, наприклад «Піранья» і «Bukovel», глушать сигнали на відстані 50 км, але їхнє програмне забезпечення вимагає ручного налаштування частот. Концепція дорозвідки, запропонована Трофименко О. та ін., передбачає автономний аналіз даних у польоті, але потребує компактних обчислювальних модулів, які поки недоступні [9, с. 168].

Таблиця 1

Типи дронів у ЗСУ та потенціал ШІ на 2025 рік

Тип дрона	Основна функція	Приклади моделей	Ефективність	Використання ШІ	Обмеження для ШІ	Потенціал із ШІ
Розвідувальні	Збір даних, коригування артилерії	«Лелека-100», «Фурия»	Дальність до 50 км	Відсутнє (ручний аналіз)	Висока швидкість, РЕБ	Аналіз відео в польоті
Ударні/Камікадзе	Знищення техніки та живої сили	«Switchblade», «Racoon»	Точність ~80 %	Відсутнє (ручне керування)	Затримки обробки, ресурси	Автономний вибір цілей
Логістичні	Доставка вантажів	«Valkyrie»	Вантаж до 20 кг	Відсутнє (ручне планування)	Простота завдань	Оптимізація маршрутів
РЕБ-дрони	Придушення зв'язку ворога	«Bukovel», «Піранья»	Дальність до 50 км	Відсутнє (ручне налаштування)	Технічна складність	Адаптивне реагування на РЕБ
Дорозвідка (потенціал)	Автономний аналіз і повернення	Немає в бойовому застосуванні	Теоретично висока	Не реалізовано	Вартість, РЕБ, технології	Самостійна обробка даних у польоті

Джерело: розроблено на основі [1–10]

Таблиця 1 систематизує типи дронів ЗСУ, їхні функції, моделі, ефективність, стан використання ШІ, обмеження та потенціал станом на квітень 2025 року. Дані ґрунтуються на аналізі літератури, що висвітлює технічні параметри, зокрема дальність, точність, автономність, а також виклики, пов'язані з апаратним і програмним забезпеченням [1–10]. Таблиця підкреслює залежність дронів від базових систем керування та обмеження ШІ через вразливість до РЕБ, недостатню обчислювальну потужність і енергоспоживання.

Перспективи розвитку дронів ЗСУ зосереджені на підвищенні автономності та стійкості до зовнішніх впливів. Ivanchenko O. та ін. пропонують модернізацію моделей, таких як «Лелека-100», для досягнення дальності 60 км і автономності 8 годин шляхом впровадження гібридних двигунів [4, с. 29]. Sorochkin O. та ін. рекомендують використовувати багатопланові системи навігації, включаючи лазерні гіроскопи з похибкою 0,01 градуса за годину, для забезпечення орієнтації без GPS протягом 30 хвилин у зонах РЕБ [7, с. 220]. Radovanović M. та ін. наголошують, що ройові технології потребують поступового розвитку через модульну координацію невеликих груп дронів, що дозволить ефективно розподіляти завдання без складної інфраструктури [8, с. 61]. Алгоритми комп'ютерного зору, такі як EfficientDet, можуть забезпечити розпізнавання об'єктів із точністю 88 % при енергоспоживанні 3 вати, що є реальним для дронів масою 8 кг. Розробка компактних процесорів із продуктивністю 1 терафлопс і вагою до 100 г, очікувана після 2026 року, усуне поточні апаратні обмеження. Впровадження протоколів зв'язку з частотним стрибанням, таких як LoRa на частоті 868 МГц, розширить дальність зв'язку до 5 км у зонах перешкод, підвищуючи стійкість до РЕБ.

Композитні матеріали, такі як армоване вуглецеве волокно, підвищують міцність корпусу дронів, дозволяючи витримувати падіння з висоти 5 метрів і пориви вітру до 15 м/с. Joshi A. та ін. пропонують використовувати літій-сірчані батареї, які краще витримують низькі температури, забезпечуючи стабільну роботу в зимових умовах [2, с. 141]. Екранування електроніки феромагнітними сплавами може зменшити вразливість до електромагнітних імпульсів, але додає 200 г ваги, що критично для легких моделей. Модульні рішення для оновлення програмного забезпечення без заміни апаратного забезпечення, як зазначають Sorochkin O. та ін., є пріоритетними для РЕБ-дронів, дозволяючи швидко адаптуватися до нових загроз [7, с. 219]. Концепція дорозвідки, запропонована Трофименко O. та ін., може кардинально змінити підхід до розвідки, дозволяючи дронам самостійно обробляти дані та повертатися з координатами цілей, мінімізуючи залежність від оператора та нестабільного зв'язку [9, с. 168]. Впровадження таких технологій потребує поступового вдосконалення апаратного забезпечення та зниження енергоспоживання обчислювальних модулів до 0,5 вата при продуктивності 0,3 терафлопс, що стане досяжним у найближчі роки.

Висновки

У результаті проведеного аналізу встановлено, що БПЛА відіграють важливу роль у реалізації завдань спостереження, навігації, передачі даних, виявлення об'єктів і радіоелектронного моніторингу. Типи БПЛА, що використовуються на практиці, демонструють широкий спектр можливостей, однак залишаються технічні виклики, зокрема обмежена автономність, залежність від зовнішніх каналів зв'язку та вразливість до перешкод у середовищі з інтенсивним радіовипромінюванням.

Інтеграція методів штучного інтелекту, таких як комп'ютерний зір, автономна навігація, оптимізація траєкторій польоту, розпізнавання об'єктів та адаптивна обробка сигналів, дозволяє значно підвищити ефективність роботи БПЛА в автономному режимі. Особливо перспективними є технології, що забезпечують стійкість до дії радіоелектронних засобів протидії, а також здатність до самостійного прийняття рішень в умовах обмеженого або відсутнього зв'язку.

Таким чином, подальший розвиток БПЛА доцільно орієнтувати на підвищення їхньої автономності, стійкості до впливу навколишнього середовища та здатності до виконання складних функцій без участі оператора. Це

включає розробку енергоефективних обчислювальних систем, вдосконалення алгоритмів машинного навчання та забезпечення безперервного функціонування в умовах інформаційної невизначеності.

Подяки

Автори висловлюють подяку Міністерству освіти і науки України за підтримку Лабораторії Інтелектуальних Систем в рамках дослідницького проекту «Інформаційні технології забезпечення стійкості інтелектуальної бортової системи малорозмірного літального апарата» (№ держреєстрації 0124U000548, 2024–2026 рр.).

Список використаної літератури

1. Литвиненко М. І., Ленець, В. Г., Гармаш Н. В., Шульга В. В. Аспекти впровадження штучного інтелекту у військовій справі. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2024. С. 13–18. DOI: 10.30748/zhups.2024.80.02
2. Joshi A., Spilbergs A., Mikelsone E. AI-Enabled Drone Autonomous Navigation and Decision Making for Defence Security. Environment, technologies, resources. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2024. Vol. 4, pp. 138–143. Rezekne Academy of Technologies. DOI: <https://doi.org/10.17770/etr2024vol4.8237>
3. Dash B., Ansari M. F., Swayamsiddha S. Fusion of Artificial Intelligence and 5G in Defining Future UAV Technologies – A Review. In *2023 International Conference on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies*. 2023. (DICCT). pp. 312–316. IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/dicct56244.2023.10110231>
4. Ivanchenko O., Kurdiuk S., Khatuntsev Yu., Rudnichenko S. Analysis of application possibilities and classification of unmanned aerial vehicles for the support of combat operators of the navy of the armed forces of Ukraine. *Наукові праці Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2023. Vol. 18, Issue 4, pp. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.18.2023.04>
5. Terzić M. Effects of the use of robotized combat systems during the conflict in Ukraine from 24.02.2022. In *Bastina*. 2024. Issue 62, pp. 363–381. Centre for Evaluation in Education and Science (CEON/CEES). DOI: <https://doi.org/10.5937/bastina34-49656>
6. Criollo L., Mena-Arciniega C., Xing S. Classification, military applications, and opportunities of unmanned aerial vehicles. In *Aviation*. 2024. Vol. 28, Issue 2, pp. 115–127. Vilnius Gediminas Technical University. DOI: <https://doi.org/10.3846/aviation.2024.21672>
7. Sorochkin, O., Sosulin M., Matveev Y. Prospects of military aviation through the integration of UAVs, AI and the latest technologies. *Communication, informatization and cybersecurity systems and technologies*. 2024. DOI:10.58254/viti.6.2024.17.215
8. Radovanović M., Petrovski A., Behlić A., Chaari M. Z., Hashimov E. G., Fellner R., Agbeyangi A. O. Unleashing Autonomous Forces: Integrating AI-Driven Drones in Modern Military Strategy. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2024. DOI:10.26906/sunz.2024.3.055
9. Трофименко О., Логінова Н., Соколов А., Чикунів П., Ахмаметьєва Г. Штучний інтелект у військовій сфері. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*. 2024. 1(25). 161–176. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.161176>
10. Гуржій С. В. Тенденції застосування технологій штучного інтелекту у військово-технічній сфері. *Інформація і право*. 2024. № 3 (50). С. 136–146. DOI: [https://doi.org/10.37750/2616-6798.2024.3\(50\).311713](https://doi.org/10.37750/2616-6798.2024.3(50).311713)

References

1. Litvinenko, M. I. & Lenets, V. G. & Garmash, N. V. & Shulga, V. V. (2024). Aspekty vprovadzhennya shtuchnoho intelektu u viys'koviy spravi [Aspects of the implementation of artificial intelligence in military affairs]. *Collection of scientific works of the Kharkiv National University of the Air Force*. 13–18. DOI: 10.30748/zhups.2024.80.02 [in Ukrainian].
2. Joshi, A., Spilbergs, A., & Mikelsone, E. (2024). AI-Enabled Drone Autonomous Navigation and Decision Making for Defence Security. Environment, technologies, resources. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (Vol. 4, pp. 138–143). Rezekne Academy of Technologies. DOI: <https://doi.org/10.17770/etr2024vol4.8237>
3. Dash, B., Ansari, M. F., & Swayamsiddha, S. (2023). Fusion of Artificial Intelligence and 5G in Defining Future UAV Technologies – A Review. In *2023 International Conference on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies*, (DICCT) (pp. 312–316). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/dicct56244.2023.10110231>
4. Ivanchenko, O., Kurdiuk, S., Khatuntsev, Yu., & Rudnichenko, S. (2023). Analysis of application possibilities and classification of unmanned aerial vehicles for the support of combat operators of the navy of the armed forces of Ukraine. *Scientific works of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification* (Vol. 18, Issue 4, pp. 23–34). State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification. DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.18.2023.04>

5. Terzic, M. (2024). Effects of the use of robotic combat systems during the conflict in Ukraine from 24.02.2022. In Bastina (Issue 62, pp. 363–381). Center for Evaluation in Education and Science (CEON/CEES). DOI: <https://doi.org/10.5937/bastina34-49656>
6. Criollo, L., Mena-Arciniega, C., & Xing, S. (2024). Classification, military applications, and opportunities of unmanned aerial vehicles. In Aviation (Vol. 28, Issue 2, pp. 115–127). Vilnius Gediminas Technical University. DOI: <https://doi.org/10.3846/aviation.2024.21672>
7. Sorochkin, O., Sosulin, M., & Matveev, Y. (2024). Prospects of military aviation through the integration of UAVs, AI and the latest technologies. Communication, informatization and cybersecurity systems and technologies. DOI:10.58254/viti.6.2024.17.215
8. Radovanović, M., Petrovski, A., Behlić, A., Chaari, M.Z., Hashimov, E.G., Fellner, R., & Agbeyangi, A.O. (2024). Unleashing Autonomous Forces: Integrating AI-Driven Drones in Modern Military Strategy. Control, Navigation and Communication Systems. Collection of Scientific Papers. DOI:10.26906/sunz.2024.3.055
9. Trofimenko, O., Loginova, N., Sokolov, A., Chikunov, P., & Akhmametyeva, G. (2024). Shtuchnyy intelekt u viys'kovi sferi [Artificial Intelligence in the Military Sphere]. Electronic Professional Scientific Publication “Cybersecurity: Education, Science, Technology”, 1(25), 161–176. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.161176> [in Ukrainian].
10. Gurzhiy, S. V. (2024). Tendentsiyi zastosuvannya tekhnolohiy shtuchnoho intelektu u viys'kovo-tekhnichniy sferi [Trends in the application of artificial intelligence technologies in the military-technical sphere]. Information and Law. No. 3 (50). P. 136–146. DOI: [https://doi.org/10.37750/2616-6798.2024.3\(50\).311713](https://doi.org/10.37750/2616-6798.2024.3(50).311713) [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025