

Левченко Д.С.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Баранов Є.О.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Гаврилук А.О.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Малий О.Ю.

Національний університет «Запорізька політехніка»

СТРУКТУРА ТА ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ СУЧАСНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ЗАВДАНЬ

Стаття присвячена дослідженню структури та основних компонентів сучасних безпілотних літальних апаратів (БпЛА) для автономних завдань. Мета роботи полягає у всебічному аналізі технологічних аспектів, що забезпечують ефективне функціонування БпЛА в умовах обмеженого зв'язку та необхідності автономного прийняття рішень. У роботі розглядаються ключові виклики, що постають перед розробниками сучасних БпЛА, зокрема: забезпечення надійної автономної навігації в умовах відсутності або нестабільності GPS-сигналу, розробка ефективних алгоритмів прийняття рішень, забезпечення надійного та захищеного зв'язку, ефективна інтеграція різних підсистем БпЛА та оптимізація енергоспоживання. Проводиться детальний аналіз п'яти основних підсистем БпЛА: силової установки, системи управління, системи зв'язку, навігаційної системи та корисного навантаження. Особлива увага приділяється порівнянню різних типів силових установок, включаючи електричні двигуни, двигуни внутрішнього згорання та перспективні іонні двигуни. Розглядаються особливості систем управління на базі бортових комп'ютерів з використанням відкритих операційних систем та систем реального часу. У статті аналізуються сучасні технології зв'язку, що використовуються в БпЛА, включаючи різні частотні діапазони та протоколи передачі даних. Детально розглядаються навігаційні системи, від простих інтегрованих систем на основі мікромеханічних датчиків до складних авіаційних інерційних навігаційних систем. Результати дослідження включають комплексний огляд ключових технологій, що лежать в основі сучасних БпЛА, таких як системи управління польотом на базі нейронних мереж, передові сенсори та датчики, енергоефективні акумуляторні системи, інноваційні матеріали та конструкції, а також алгоритми штучного інтелекту для обробки даних та прийняття рішень. Особливу увагу в роботі приділено питанням автономної навігації БпЛА, включаючи методи візуальної одометрії, SLAM та використання нейронних мереж для обробки сенсорних даних. Підкреслюється важливість інтеграції різних технологій для досягнення синергетичного ефекту, що дозволяє БпЛА ефективно виконувати складні автономні завдання.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (БпЛА), автономна навігація, системи управління польотом, сенсорні технології, енергетичні системи, штучний інтелект, обробка даних в реальному часі, інерціальні навігаційні системи, SLAM, візуальна одометрія, адаптивні алгоритми, нормативно-правове регулювання.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток технологій безпілотних літальних апаратів (БпЛА) відкриває нові горизонти їх застосування у різноманітних сферах людської діяльності [1, с. 80]. Однак, разом з розширенням можливостей БпЛА, зростає і складність завдань, які вони повинні виконувати, особливо в умовах автономної роботи. Це створює ряд критичних викликів, які потребують комплексного вирішення.

Забезпечення надійної автономної навігації БпЛА в умовах відсутності або нестабільності GPS-сигналу стає все більш актуальним [2, с. 24]. Це тісно пов'язано з необхідністю розробки ефективних алгоритмів прийняття рішень для БпЛА в автономному режимі, здатних адекватно реагувати на зміни навколишнього середовища та оптимізувати маршрут без постійного контролю оператора [3, с. 334].

Ефективна інтеграція різних підсистем БПЛА, включаючи навігаційну систему, систему управління польотом, сенсори та системи зв'язку, залишається складним завданням, яке вимагає оптимальної взаємодії всіх компонентів та ефективної обробки даних в реальному часі [4, с. 200]. Це безпосередньо впливає на енергоефективність БПЛА, де збільшення тривалості польоту та розширення функціональних можливостей апаратів вимагає розробки більш ефективних джерел живлення та оптимізації енергоспоживання всіх бортових систем [5, с. 175].

Вирішення цих взаємопов'язаних проблем вимагає комплексного підходу, який би враховував технологічні аспекти розробки та застосування БПЛА. Це створює потребу в міждисциплінарних дослідженнях та розробці інноваційних рішень, які дозволять повною мірою реалізувати потенціал БПЛА в умовах автономної роботи [6, с. 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій
Останні роки характеризуються значним прогресом у розробці та вдосконаленні технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що знаходить відображення у численних дослідженнях та публікаціях. Особлива увага приділяється проблемам автономної навігації та функціонування БПЛА.

У роботі Афтаназів І.С. та співавторів [7, с. 58] представлено комплексний огляд методів керування БПЛА, де особливий акцент зроблено на алгоритмах автономного прийняття рішень. Автори підкреслюють важливість розробки адаптивних систем управління, здатних ефективно функціонувати в динамічних середовищах.

Печурін М.К. та ін [8, с. 50] розглядають сучасні підходи до автономної навігації БПЛА, зокрема, методи візуальної одометрії та SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Автори наголошують на перспективності цих технологій для забезпечення надійної навігації в умовах відсутності GPS-сигналу.

Постановка завдання. Аналіз цих та інших публікацій свідчить про комплексний характер проблем, пов'язаних з розробкою та застосуванням БПЛА для автономних завдань. Дослідники підкреслюють необхідність міждисциплінарного підходу, який би охоплював технологічні аспекти використання БПЛА. Разом з тим, залишається ряд невирішених питань, зокрема, в області надійної автономної навігації в складних умовах, ефективної інтеграції різних підсистем БПЛА та забезпечення їх енергоефективності, що вказує на актуальність подальших досліджень у цій сфері.

Виклад основного матеріалу. Сучасний БПЛА є складною системою, що складається з багатьох взаємопов'язаних компонентів. Розуміння цієї структури є ключовим для розробки ефективних автономних систем (рис. 1).

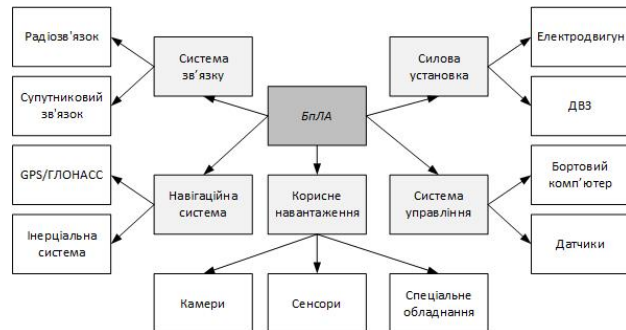


Рис. 1. Структура БПЛА

Як видно з рисунку 1, БПЛА складається з п'яти основних підсистем:

1. Силова установка забезпечує енергію для польоту та роботи всіх систем. Може бути представлена електродвигуном або двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ).

2. Система управління включає бортовий комп'ютер та різноманітні датчики для контролю стану БПЛА та навколишнього середовища.

3. Система зв'язку забезпечує обмін даними між БПЛА та наземною станцією управління або іншими БПЛА.

4. Навігаційна система відповідає за визначення положення БПЛА у просторі та планування маршруту. Включає GPS/ГЛОНАСС приймачі та інерціальні системи навігації.

5. Корисне навантаження складається з обладнання, необхідного для виконання конкретних завдань – камер, сенсорів та іншого спеціалізованого обладнання.

Розглянемо детальніше основні підсистеми БПЛА [9, с. 30]. За типом силової установки БПЛА поділяються на ті, що використовують електричні двигуни, та оснащені двигунами внутрішнього згоряння, включаючи ракетні двигуни. Двигуни на рідкому паливі мають перевагу в тривалості роботи (8–10 годин), тоді як електричні БПЛА функціонують 3–4 години, але відрізняються вищою надійністю та маневреністю. Ведуться розробки БПЛА з іонними двигунами, які мають високу економічність, але низьку тягу.

Керування БПЛА здійснюється бортовим комп'ютером з використанням відкритих операційних систем або спеціалізованих систем реального часу. Основне призначення програмного забезпечення – обробка інформації від датчиків

для управління силовою установкою та системою зв'язку. Сучасні рішення інтегрують бортовий комп'ютер та основні системи на єдиній платі з процесором архітектури RISC ARM.

Для комунікації використовується командна радіолінія зв'язку, що функціонує в різних частотних діапазонах. На великих відстанях застосовуються БПЛА-ретранслятори або супутниковий зв'язок. У простих БПЛА можуть використовуватися мобільні мережі, WiFi, WiMAX та LTE. При відсутності команд, БПЛА переходить в режим автопілотування з використанням різних алгоритмів.

Основними навігаційними системами БПЛА є супутникові радіонавігаційні системи. Прості системи забезпечують точність 1–2,5 м, складніші використовують додаткові елементи. Проблемою є висока маса точних систем, тому на легких БПЛА встановлюються простіші системи з мікромеханічними датчиками. Їх точність без корекції від супутникових систем обмежена, але може бути підвищена за допомогою додаткових засобів, таких як барометри та лазерні висотоміри.

Залежно від специфіки поставлених завдань, на борту БПЛА можуть додатково встановлюватися такі системи та пристрої, як: система розвідки (оптико-електронної, тепловізійної, радіолокаційної, радіо- та радіотехнічної, радіаційної, хімічної, бактеріологічної та інших видів розвідки); засоби для радіоелектронної боротьби або пристрої радіоелектронних перешкод; при-

строї наведення та корекції керованої зброї; засоби ураження цілей різних типів; засоби управління та зв'язку з наземним пунктом управління; апаратура автоматичного пілотування та посадки; транспортувальні касети, відсіки, кріплення тощо (табл. 1).

Сучасні БПЛА поєднують передові технології, які постійно вдосконалюються [10, с. 88]. Основу їх оснащення складають системи управління польотом, сенсори, технології зв'язку, енергетичні системи, інноваційні матеріали та алгоритми штучного інтелекту (рис. 2).



Рис. 2. Ключові технології БПЛА

Системи управління польотом у сучасних БПЛА включають складні автопілоти з комбінацією датчиків для точного визначення положення та орієнтації. Алгоритми на основі нечіткої логіки та нейронних мереж забезпечують адаптивність до різних умов польоту.

Таблиця 1

Основні систем БПЛА

Система БПЛА	Ключові характеристики	Особливості
1. Силова установка	– Електричні двигуни – Двигуни внутрішнього згорання – Ракетні двигуни – Іонні двигуни (розробляються)	– ДВЗ: тривалий час роботи (8-10 год) – Електродвигуни: 3-4 год роботи, надійні, легкі – Іонні: економічні, тривалий час роботи, слабка тяга
2. Електронна система управління	– Бортовий комп'ютер – ОС: Linux або спеціалізовані системи реального часу	– Обробка даних з датчиків – Управління двигуном та зв'язком – Тенденція до інтеграції на одній платі – Процесор: архітектура RISC ARM
3. Система зв'язку «телеметрії»	– Командна радіолінія – Діапазони: УКХ, L, S, C, X – Для малих БПЛА: мобільні мережі, WiFi, WiMAX, LTE	– Дальній зв'язок: БПЛА-ретранслятори, супутниковий зв'язок – Автопілот при втраті зв'язку
4. Навігаційна система	– Супутникові радіонавігаційні системи – Частоти: 1,1-1,6 ГГц – Додаткові елементи: акселерометри, гіроскопи, барометри, лазерні висотоміри	– Точність для малих БПЛА: 1-2,5 м – Проблема: висока маса точних систем – Рішення для малих БПЛА: мікромеханічні датчики – Похибка без корекції: до 3 м за 1 хв
5. Додаткові системи	– Системи розвідки – Засоби радіоелектронної боротьби – Пристрої наведення зброї – Засоби ураження цілей – Апаратура автопілотування та посадки	Встановлюються залежно від конкретних завдань БПЛА

Сенсори, такі як лідари, мультиспектральні камери та радары, розширюють можливості БпЛА для виконання різноманітних завдань. Технології зв'язку забезпечують надійну передачу даних та команд, включаючи захищені протоколи та супутниковий зв'язок.

Енергетичні системи вдосконалюються для підвищення тривалості польотів, використовуючи літій-полімерні акумулятори та гібридні силові установки. Передові матеріали та конструкції дозволяють створювати легкі та міцні БпЛА.

Штучний інтелект та обробка даних відіграють важливу роль, дозволяючи дронам розпізнавати об'єкти та приймати автономні рішення. Інтеграція цих технологій розширює можливості БпЛА у різних галузях.

Автономна навігація є ключовим аспектом, особливо в умовах відсутності GPS-сигналу, забезпечуючи безпечне та точне переміщення дрона.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було здійснено комплексний аналіз структури та основних компонентів сучасних безпілотних літальних апаратів (БпЛА) для автономних завдань. Виявлено, що ключовими елементами БпЛА є силова установка, система управління, система зв'язку, навігаційна система та корисне навантаження, кожна з яких відіграє критичну роль у забезпеченні ефективного функціонування апарату. Встановлено, що сучасні БпЛА характеризуються високим рівнем інтеграції різноманітних передових технологій, включаючи системи

управління польотом на базі нейронних мереж, високоточні сенсори, енергоефективні акумуляторні системи та алгоритми штучного інтелекту для обробки даних та прийняття рішень.

Особливу увагу було приділено проблемам автономної навігації БпЛА, зокрема в умовах відсутності або нестабільності GPS-сигналу. Визначено перспективність методів візуальної одометрії та SLAM для забезпечення надійної навігації в складних умовах. Аналіз показав, що ефективна інтеграція різних підсистем БпЛА та оптимізація енергоспоживання залишаються ключовими викликами для розробників. Вирішення цих проблем вимагає комплексного міждисциплінарного підходу та подальших досліджень у галузі автономних систем управління, енергоефективних технологій та адаптивних алгоритмів прийняття рішень.

Результати дослідження підкреслюють важливість подальшого розвитку технологій БпЛА для розширення їх можливостей та сфер застосування. Зокрема, перспективними напрямками є вдосконалення систем автономного прийняття рішень, розробка більш ефективних джерел живлення та оптимізація взаємодії різних підсистем БпЛА. Таким чином, дане дослідження створює основу для подальших розробок у сфері автономних БпЛА та окреслює ключові напрямки для інновацій, що можуть значно розширити можливості використання безпілотних технологій у різноманітних галузях людської діяльності.

Список літератури:

1. UAV sensor platform / G. A. Sandness et al. *Journal of environmental and engineering geophysics*. 1997. Vol. 2, no. 2. P. 79–88. URL: <https://doi.org/10.4133/jeeg2.2.79> (date of access: 08.10.2024).
2. Деркач М. В., Матюк Д. С. Застосування модулю GY-521 для орієнтації БПЛА. *ВІСНИК СХІДНОУ-КРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ імені Володимира Даля*. 2020. № 7 (263). С. 24–28. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-24-28> (дата звернення: 08.10.2024).
3. Гула В. Сенсори та методи візуальної навігації для автономних БпЛА. *Grail of science*. 2024. № 42. С. 333–335. URL: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.02.08.2024.046> (дата звернення: 08.10.2024).
4. Grzyb Ł., Gazda K. Uav forensics. *Cybersecurity & cybercrime*. 2024. Vol. 1, no. 4. P. 195–212. URL: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.7105> (date of access: 08.10.2024).
5. Кучеренко О. І., Вакалюк Т. А. Огляд технічних та програмних засобів керування БпЛА. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 2(89). С. 170–176. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.24> (дата звернення: 08.10.2024).
7. Особливості розгортання мереж мобільного зв'язку за допомогою БпЛА / А. В. Антоненко та ін. *Таврійський науковий вісник. Серія: технічні науки*. 2024. № 3. С. 3–12. URL: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.3.1> (дата звернення: 08.10.2024).
8. Уточнення координат ворожих БПЛА засобами кінематичного проектування / І. С. Афтаназів та ін. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2024. Т. 34, № 1. С. 53–60. URL: <https://doi.org/10.36930/40340108> (дата звернення: 08.10.2024).
9. Моделі топологій слабовипромінюючої телекомунікаційної системи взаємодіючих БПЛА / М. К. Печурін та ін. *Problems of informatization and management*. 2022. Т. 4, № 72. С. 48–54. URL: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.72.17461> (дата звернення: 08.10.2024).
10. Особливості застосування безпілотних літальних апаратів органами та підрозділами поліції: метод. рек. / А. А. Саковський, С. М. Науменко, С. І. Кравченко, І. М. Єфіменко та ін. Київ: Нац. акад. внутр. справ. 2022. 72 с.

Levchenko D.S., Baranov E.O., Gavryliuk A.O., Malyi O.Yu. STRUCTURE AND MAIN COMPONENTS OF MODERN UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR AUTONOMOUS TASKS.

The article is devoted to the study of the structure and main components of modern unmanned aerial vehicles (UAVs) for autonomous tasks. The purpose of the work is to comprehensively analyze the technological aspects that ensure the effective functioning of UAVs in conditions of limited communication and the need for autonomous decision-making. The paper discusses the key challenges faced by developers of modern UAVs, in particular: ensuring reliable autonomous navigation in the absence or instability of a GPS signal, developing effective decision-making algorithms, ensuring reliable and secure communication, effective integration of various UAV subsystems and optimization of power consumption. A detailed analysis of the five main subsystems of the UAV is carried out: power plant, control system, communication system, navigation system and payload. Particular attention is paid to comparing different types of propulsion systems, including electric engines, internal combustion engines, and advanced ion engines. The features of control systems based on on-board computers using open operating systems and real-time systems are considered. The article analyzes modern communication technologies used in UAVs, including various frequency bands and data transmission protocols. The following are considered in detail navigation systems, from simple integrated systems based on micromechanical sensors to complex aircraft inertial navigation systems. The research findings include a comprehensive review of the key technologies underlying of modern UAVs, such as neural network-based flight control systems, advanced sensors and transducers, energy-efficient battery systems, innovative materials and structures, and artificial intelligence algorithms for data processing and decision making. Particular attention is paid to the following issues autonomous navigation of UAVs, including visual odometry, SLAM, and the use of neural networks for processing sensor data. The importance of integrating different technologies to achieve a synergistic effect that allows UAVs to effectively perform complex autonomous tasks is emphasized.

Key words: *unmanned aerial vehicles (UAVs), autonomous navigation, flight control systems, sensor technologies, energy systems, artificial intelligence, real-time data processing, inertial navigation systems, SLAM, visual odometry, adaptive algorithms, regulatory framework.*