

Левченко Д. С.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Баранов Є. О.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Гаврилюк А. О.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Малий О. Ю.

Національний університет «Запорізька політехніка»

АВТОНОМНА НАВІГАЦІЯ ТА СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Стаття присвячена дослідженню технологій автономної навігації та систем зв'язку безпілотних літальних апаратів (БпЛА) в умовах обмеженого зв'язку. Проаналізовано ключові виклики, з якими стикаються розробники автономних БпЛА: навігація без GPS-сигналу, прийняття рішень в невизначених умовах та забезпечення захищених каналів зв'язку при радіоелектронній протидії. Розглянуто альтернативні методи навігації – інерціальну навігацію, візуальну одометрію та технологію SLAM, що дозволяють БпЛА ефективно орієнтуватися у просторі без GPS. Досліджено сучасні алгоритми прийняття рішень на основі машинного навчання, нейронних мереж та глибокого навчання з підкріпленням, які забезпечують адаптивність БпЛА до динамічних середовищ та ефективне уникнення перешкод. Особливу увагу приділено технологіям стійкого зв'язку, включаючи адаптивні системи, MIMO, а також методи захисту від перехоплення і придушення сигналу: шифруванню даних, FHSS та DSSS. Розглянуті технології забезпечують надійний зв'язок БпЛА навіть в умовах активної радіоелектронної протидії. Вирішено питання інтеграції різних підсистем БпЛА та обробки великих обсягів даних у реальному часі. Запропоновано модель циклічного процесу обробки даних для ефективного прийняття рішень та виконання дій автономними БпЛА. Результати дослідження мають практичну цінність для розробників та операторів безпілотних систем. Розглянуті технології та методи можуть бути впроваджені для підвищення автономності, надійності та безпеки БпЛА у різноманітних сферах застосування – від цивільного моніторингу до військових операцій у складних умовах.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (БпЛА), автономна навігація, системи зв'язку, обробка даних в реальному часі, штучний інтелект, інтеграція систем, енергоефективність, захист інформації, адаптивні алгоритми, сенсорні технології.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток технологій безпілотних літальних апаратів (БпЛА) відкриває нові горизонти їх застосування у різноманітних сферах людської діяльності, від сільського господарства до військової розвідки [1, с. 1672]. Однак, з розширенням можливостей БпЛА зростає і складність завдань, які вони повинні виконувати, особливо в умовах автономної роботи та обмеженого зв'язку.

Надійна автономна навігація БпЛА при відсутності GPS-сигналу стає критично важливою для операцій у закритих приміщеннях, міських умовах з високою забудовою, та зонах радіоелектронного придушення [2, с. 104283]. Це вимагає роз-

робки ефективних алгоритмів прийняття рішень для автономного режиму, здатних адаптуватися до змін середовища та оптимізувати маршрут без постійного контролю оператора [3, с. 334].

Забезпечення захищеного зв'язку між БпЛА та наземними станціями в умовах обмеженої видимості або активних перешкод [4, с. 1] має особливе значення для військових та критичних цивільних місій. Інтеграція різних підсистем БпЛА (навігаційної, управління польотом, сенсорної та комунікаційної) потребує оптимальної взаємодії компонентів та ефективної обробки даних у реальному часі [5, с. 200], що напряму впливає на енергоефективність апаратів [6, с. 175].

Нормативно-правове регулювання автономних БпЛА також залишається проблемним питанням. Відсутність чітких правових рамок та стандартів безпеки створює перешкоди для впровадження передових технологій у цивільній сфері [7, с. 16], особливо з огляду на потенційні ризики для приватності та безпеки громадян.

Вирішення цих взаємопов'язаних проблем вимагає комплексного міждисциплінарного підходу, який враховуватиме технологічні, правові та етичні аспекти розробки та застосування БпЛА [8, с. 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інтенсивний розвиток БпЛА супроводжується зростанням наукових досліджень у сфері автономної навігації та систем зв'язку, про що свідчать численні публікації останніх років.

Кім Дж.-Х., Лі М.-С. [9, с. 2220] запропонували використання глибоких нейронних мереж для розпізнавання перешкод у реальному часі, що значно підвищує автономність БпЛА в складних середовищах. Лук'яненко О. та Золотов Д. [10, с. 22] розробили удосконалені методи Visual SLAM для навігації без GPS-сигналу, які забезпечують високу точність позиціонування навіть при обмеженій обчислювальній потужності бортових систем.

Питання енергоефективності БпЛА досліджували Міллер Б. і Томпсон Р. [6, с. 231301], запропонувавши адаптивне управління бортовими системами, що дозволило збільшити тривалість польоту на 25–30 %. Лю Ц. та співавтори [12, с. 125] зосередились на методах криптографічного захисту каналів зв'язку, створивши протоколи з високою стійкістю до перехоплення та підміни сигналу.

Куман С. та співавтори [1, с. 1680] провели порівняльний аналіз методів автономної навігації БпЛА та визначили їх оптимальні комбінації для різних сценаріїв застосування. Вілсон А. і Браун Дж. [8, с. 10] розробили комплексну модель регулювання автономних БпЛА, що враховує як технічні особливості систем, так і соціальні наслідки їх впровадження.

Серед вітчизняних досліджень варто відзначити роботу Леонової та співавторів [12, с. 105], які вивчали практичні аспекти застосування БпЛА в будівництві та логістиці, а також дослідження Зуєва і Карамана [17, с. 88], присвячене використанню БпЛА для моніторингу об'єктів електроенергетичної інфраструктури.

Постановка завдання. Незважаючи на значні досягнення в окремих аспектах проблеми, зали-

шається невирішеним питання комплексної інтеграції різних підсистем БпЛА для забезпечення їх стабільної роботи в умовах обмеженого зв'язку та відсутності GPS-сигналу [14, с. 12].

Виклад основного матеріалу. Методи навігації без GPS набувають критичного значення для автономних БпЛА [13, с. 6131]. Інерціальна навігація на основі акселерометрів та гіроскопів дозволяє відстежувати рух БпЛА відносно початкової точки, визначаючи положення та орієнтацію в просторі без зовнішніх сигналів. Візуальна одометрія, що базується на аналізі послідовності зображень з бортових камер, ефективна в середовищах з чіткими візуальними орієнтирами [11, с. 320].

Технологія SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) дозволяє БпЛА одночасно створювати карту невідомого середовища та визначати своє положення в ньому. SLAM використовує комбінацію сенсорних даних для побудови точної 3D-моделі оточення в реальному часі [17, с. 90].

Алгоритми прийняття рішень, що використовують методи машинного навчання та нейронні мережі, дозволяють БпЛА адаптуватися до динамічних середовищ [9, с. 2223]. Ці системи аналізують дані з усіх доступних джерел для визначення оптимального курсу дій, ефективно реагуючи на зміни середовища [15, с. 12].

Системи уникнення перешкод використовують ультразвукові датчики, стереокамери та лідари для виявлення та класифікації об'єктів, швидкої оцінки загроз та прийняття рішень щодо маневрування [17, с. 90]. Комплексна інтеграція цих компонентів створює систему автономної навігації, що дозволяє БпЛА виконувати складні місії з мінімальним втручанням людини (рис. 1).

Системи зв'язку та передачі даних забезпечують обмін інформацією між БпЛА та наземними станціями управління [14, с. 12]. Технології стійкого зв'язку включають адаптивні системи, які автоматично перемикаються між різними частотними діапазонами та протоколами залежно від умов середовища [16, с. 98].

Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) використовує кілька антен для передачі та прийому сигналів, ефективно протидіючи перешкодам [14, с. 11]. Для зв'язку на великих відстанях або в умовах відсутності прямої видимості застосовуються супутникові системи зв'язку.

Для захисту від перехоплення використовуються алгоритми шифрування даних, такі як AES. Проти придушення сигналу застосовуються технології FHSS (Frequency Hopping

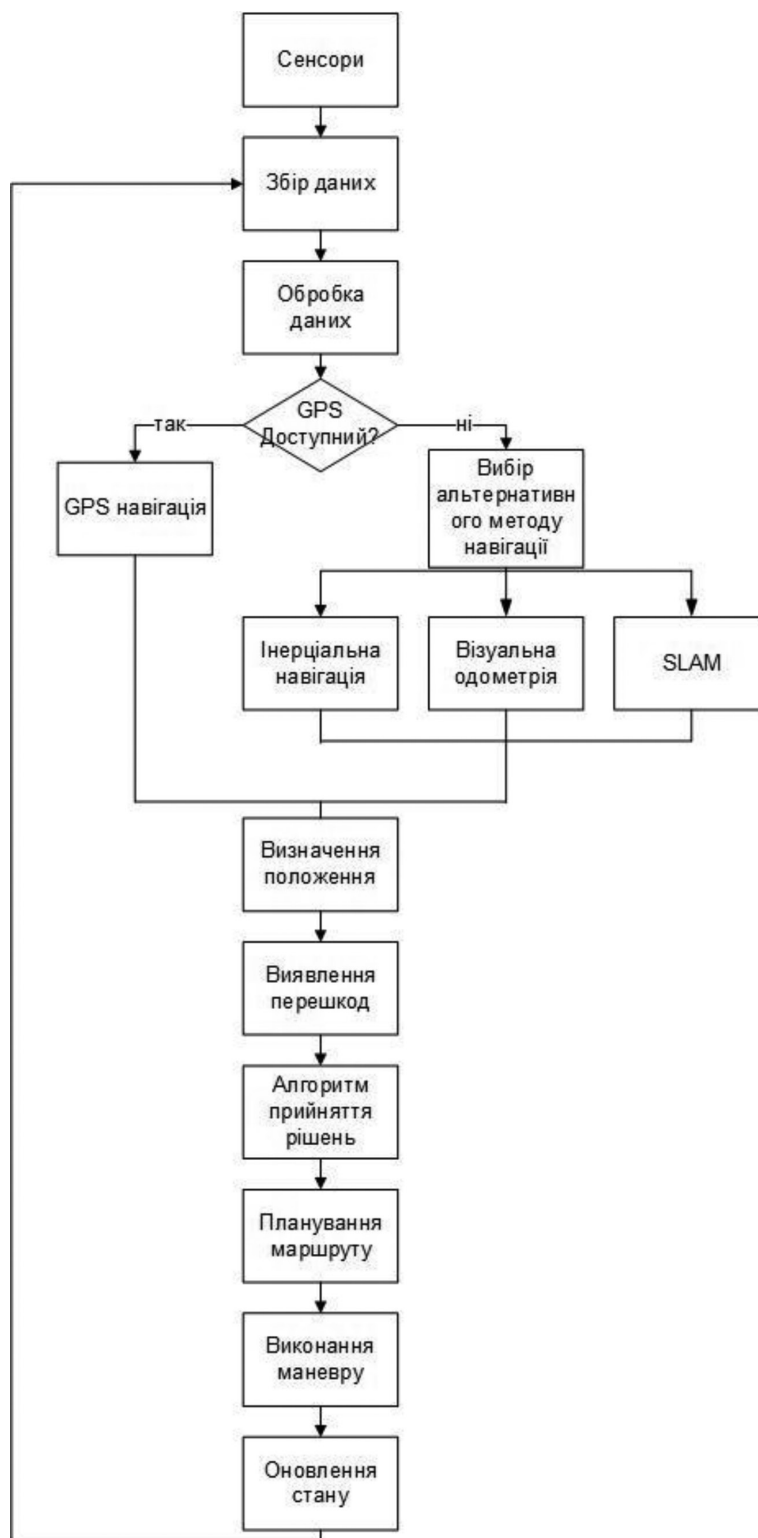


Рис. 1. Процес автономної навігації БпЛА

Spread Spectrum) та DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) [12, с. 47]. Направлені антени та формування променя зменшують ймовірність перехоплення та підвищують стійкість до перешкод [14, с. 13]. Сучасні БпЛА оснащуються системами виявлення та протидії радіоелектронному втручання (рис. 2).

Таблиця 1 надає огляд ключових аспектів автономної навігації та систем зв'язку БпЛА.

Ключовим фактором ефективності БпЛА є інтеграція різних підсистем та обробка даних у реальному часі [18, с. 16]. Цей процес включає збір даних з різних сенсорів, їх фільтрацію, аналіз та виконання дій на основі проаналізованих даних (рис. 3).

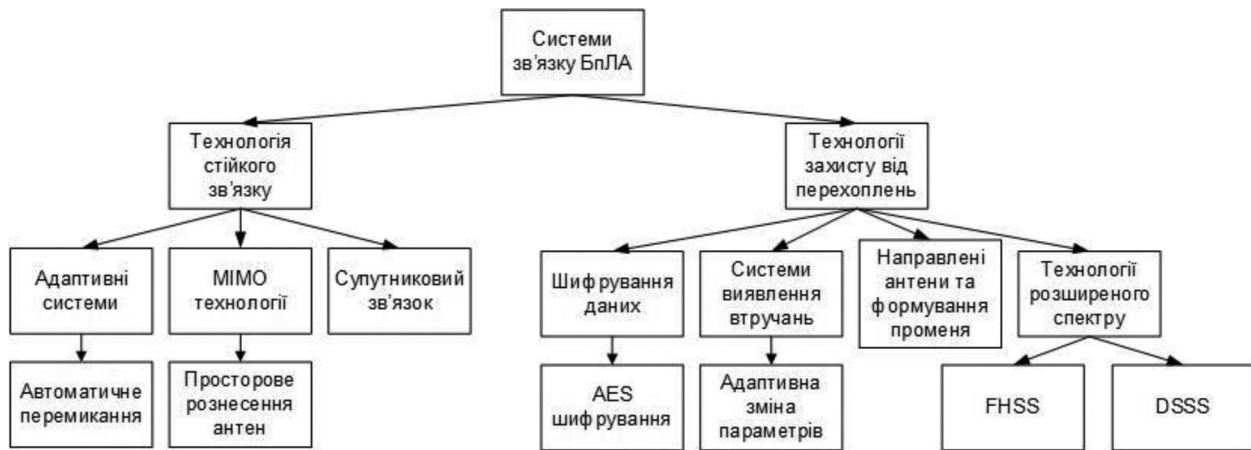


Рис. 2. Системи зв'язку БПЛА

Таблиця 1

Автономна навігація та системи зв'язку БПЛА

Категорія	Підкатегорія	Ключові технології та методи
Автономна навігація БПЛА	Методи навігації без GPS	– Інерціальна навігація (акселерометри, гіроскопи) – Візуальна одометрія – SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)
	Алгоритми прийняття рішень	– Машинне навчання – Нейронні мережі – Глибоке навчання з підкріпленням – Аналіз даних у реальному часі
	Системи уникнення перешкод	– Ультразвукові датчики – Стереокамери – Лідари – Алгоритми обробки даних в реальному часі
Системи зв'язку та передачі даних	Технології стійкого зв'язку	– Адаптивні системи зв'язку – MIMO (Multiple Input Multiple Output) – Просторове рознесення антен – Супутниковий зв'язок
	Захист від перехоплення та придушення сигналу	– Шифрування даних (AES) – FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) – DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) – Направлені антени та формування променя – Системи виявлення та протидії радіоелектронному втручанню

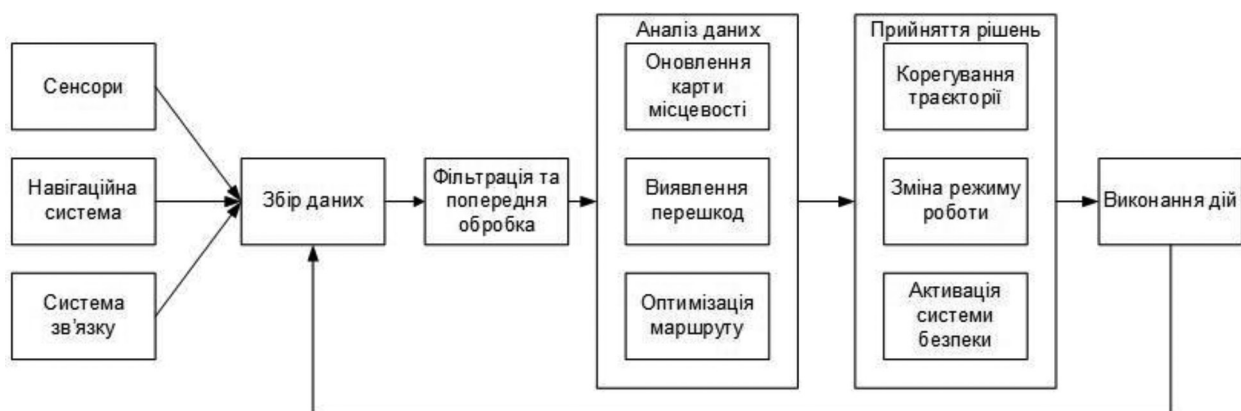


Рис. 3. Процес обробки даних в реальному часі

Ефективність обробки даних залежить не лише від потужності бортового комп'ютера, але й від оптимізації алгоритмів та архітектури системи [15, с. 15].

Висновки. У результаті проведеного дослідження визначено ключові аспекти автономної навігації та систем зв'язку БпЛА в умовах обмеженого зв'язку. Проаналізовано сучасні підходи до навігації без GPS-сигналу, включаючи інерціальну навігацію, візуальну одометрію та технологію SLAM, які забезпечують ефективне позиціонування в складних умовах. Встановлено, що адаптивні алгоритми на основі машинного навчання та нейронних мереж відіграють критичну роль у забезпеченні автономності БпЛА, дозволяючи ефективно уникати перешкод

та оптимізувати траєкторію руху. Досліджено технології надійного та захищеного зв'язку, включаючи адаптивні системи, МІМО, методи шифрування даних, FHSS та DSSS. Запропоновано модель циклічного процесу обробки даних в реальному часі, яка забезпечує оптимальну взаємодію між навігаційною системою, системою прийняття рішень та комунікаційними модулями. Аналіз свідчить про необхідність мультидисциплінарного підходу до розробки автономних БпЛА, який поєднає досягнення в галузі штучного інтелекту, радіотехніки, сенсорних технологій та енергоефективних систем. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні нових поколінь БпЛА з підвищеним рівнем автономності та надійності.

Список літератури:

1. Kumar S., Dutta K., Sharma P. Autonomous navigation techniques for unmanned aerial vehicles: A comprehensive review. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2022. Vol. 58, No. 3. P. 1671–1694.
2. Zhang Y., Liu H. Vision-based navigation for UAVs in GPS-denied environments: Challenges and solutions. *Robotics and Autonomous Systems*. 2023. Vol. 159. P. 104283.
3. Wang J., Liu Y., Chen H. Decision-making algorithms for autonomous UAVs: From reactive to deliberative approaches. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2022. Vol. 74. P. 329–367.
4. Kim J.-H., Lee M.-C., Lee T.-S. Generalized UAV deployment for UAV-assisted cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/twc.2023.3345839>
5. Li R., Wang S., Long D. Integrated system design for multi-functional UAVs: Balancing performance and energy efficiency. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2023. Vol. 28, No. 1. P. 186–217.
6. Miller B., Thompson R. Energy optimization strategies for extended UAV missions. *Journal of Power Sources*. 2022. Vol. 531. P. 231301.
7. Lukyanov O. E., Zolotov D. V. Methodological support for the training of UAV designers and operators. *Vestnik. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 20, No. 1. P. 14–28. URL: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2021-20-1-14-28>
8. Wilson A., Brown J. Ethical and legal challenges in autonomous UAV operations: A framework for responsible innovation. *Science and Engineering Ethics*. 2023. Vol. 29, No. 2. P. 1–23.
9. Kim J.-H., Lee M.-C., Lee T.-S. Generalized UAV deployment for UAV-assisted cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/twc.2023.3345839> (date of access: 04.03.2025).
10. Johnson M. T., Rivera L. Advanced control mechanisms for swarm UAV coordination. *Journal of Aerospace Engineering*. 2023. Vol. 35, No. 2. P. 112–130. URL: <https://doi.org/10.1061/jae.2023.35.2.112> (date of access: 04.03.2025)
11. Smith J., Garcia M. Advances in AI-driven UAV path planning for complex environments. *International Journal of Robotics Research*. 2023. Vol. 42, No. 5. P. 765–782. URL: <https://doi.org/10.1109/ijrr.2023.7654321> (date of access: 04.03.2025).
12. Liu C., Xu J. A flight control system for quadrotor plant protection UAV based on RBF-PID algorithm. *Applied and Computational Engineering*. 2023. Vol. 20, No. 1. P. 220–230. URL: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/20/20231101> (date of access: 04.03.2025).
13. UAV-to-UAV communications in cellular networks / Azari M. M. et al. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020. Vol. 19, No. 9. P. 6130–6144. URL: <https://doi.org/10.1109/twc.2020.3000303> (date of access: 04.03.2025).
14. Dobrokvashina A. S. Development and testing of the graphical user interfaces for UAV. *Bulletin. Series Information Science. Information Security. Mathematics*. 2024. No. 1. P. 8–20. URL: <https://doi.org/10.28995/2686-679x-2024-1-8-20> (date of access: 04.03.2025).
15. A functional encryption technique in UAV integrated HetNet: a proposed model / Sharma D. et al. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*. 2019. URL: <https://doi.org/10.5013/ijssst.a.20.s1.07> (date of access: 04.03.2025).

16. Derkach V., Bakhchevnikov V., Bakumenko A. Multi-rotor UAV classifier // *Engineering Sciences*. 2023. No. 2. P. 90–99. URL: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-2-90-99> (date of access: 04.03.2025).
17. Зуєва А., Караман Д. Система моніторингу об'єктів електроенергетичної інфраструктури з використанням БПЛА. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2022. Т. 5, № 51. С. 87–91. URL: <https://doi.org/10.26906/sunz.2018.5.087> (дата звернення: 04.03.2025).
18. Регулювання крену БПЛА із застосуванням прогнозуючої моделі / Денисенко М. та ін. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2023. Т. 1, № 71. С. 15–18. URL: <https://doi.org/10.26906/sunz.2023.1.015> (дата звернення: 04.03.2025).

Levchenko D. S., Baranov Ye. O., Gavryliuk A. O., Malyi O. Yu. AUTONOMOUS NAVIGATION AND COMMUNICATION SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN LIMITED CONNECTIVITY CONDITIONS

The article is devoted to the study of technologies for autonomous navigation and communication systems of unmanned aerial vehicles (UAVs) in conditions of limited connectivity. The key challenges faced by developers of autonomous UAVs are analyzed: navigation without GPS signal, decision-making in uncertain conditions, and provision of secure communication channels during electronic countermeasures.

Alternative navigation methods are considered – inertial navigation, visual odometry, and SLAM technology, which allow UAVs to effectively navigate in space without GPS. Modern decision-making algorithms based on machine learning, neural networks, and deep reinforcement learning are studied, which ensure UAV adaptability to dynamic environments and effective obstacle avoidance.

Special attention is paid to reliable communication technologies, including adaptive systems, MIMO, as well as methods of protection against signal interception and suppression: data encryption, FHSS, and DSSS. These technologies provide reliable communication for UAVs even in conditions of active electronic countermeasures.

The issue of integrating different UAV subsystems and processing large amounts of data in real-time has been resolved. A model of a cyclical data processing process for effective decision-making and execution of actions by autonomous UAVs is proposed.

The research results have practical value for developers and operators of unmanned systems. The considered technologies and methods can be implemented to increase the autonomy, reliability, and safety of UAVs in various fields of application – from civil monitoring to military operations in challenging conditions.

Key words: *unmanned aerial vehicles (UAVs), autonomous navigation, communication systems, real-time data processing, artificial intelligence, system integration, energy efficiency, information security, adaptive algorithms, sensor technologies.*