

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-25>

УДК 629.735.05

СПАСЬКИЙ ЯРОСЛАВ

Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
e-mail: jarikspasky@gmail.com

БОНДАРЕНКО ВІКТОР

Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1663-4799>
e-mail: vicnbondarenko@gmail.com

БОНДАРЕНКО НАТАЛІЯ

Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9237-8187>
e-mail: nalbondarenko@gmail.com

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТА НАВІГАЦІЇ БПЛА

У статті представлено підхід до створення системи управління та навігації для безпілотного літального апарата, яка здатна забезпечити стабільну роботу навіть в умовах радіоелектронної боротьби. Запропоновано структурно-функціональну схему системи, наведено опис її складових. Представлено основні принципи управління, навігації, захисту зв'язку та передачі даних. Розроблена система об'єднує класичні алгоритми управління, сучасні протоколи передачі даних, захищені модулі GPS, інерційні системи та резервну навігацію за азимутом. Описано основні режими польоту та їх призначення. Реалізація системи здійснена з урахуванням потреб військових та цивільних застосувань з орієнтацією на надійність, автономність і адаптивність. Запропоновано шляхи удосконалення системи управління та навігації. В результаті створено функціональну систему, яка протестована в умовах, наближених до бойових.

Ключові слова: БПЛА, польотний контролер, ПІД-регулятор, GPS, РЕБ, інерційна навігація.

SPASKYI YAROSLAV**BONDARENKO VIKTOR****BONDARENKO NATALIYA**

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

UAV CONTROL AND NAVIGATION SYSTEM

This article presents a comprehensive approach to the design and implementation of a modern control and navigation system for unmanned aerial vehicles (UAVs), specifically developed to ensure operational stability even under the challenging conditions of electronic warfare (EW). The study introduces a detailed structural and functional architecture that integrates classical control algorithms, proportional-integral-derivative (PID) controllers, advanced GPS modules with spoofing and jamming protection, as well as inertial navigation systems capable of compensating for GPS loss. Additionally, the system employs backup azimuth-based navigation, ensuring safe return even when all external navigation signals are compromised.

A key feature of the presented system is its modular adaptability, supporting both military and civilian use cases, including long-range reconnaissance, environmental monitoring, logistics, and emergency rescue operations. The communication subsystem leverages LoRa and CRFSF/ELRS protocols with frequency-hopping techniques to maintain secure, interference-resistant data channels. High-power video transmitters and telemetry overlays provide real-time situational awareness for the operator, supported by a user-friendly interface. The system was rigorously tested under near-combat conditions, demonstrating reliable signal integrity at distances up to 25 km, stable flight performance, and autonomous return-to-launch (RTL) behavior. Moreover, software-level enhancements, including modified ArduPilot firmware and pseudo-random frequency reassignment, significantly improved operational resilience.

Future improvements include integrating artificial intelligence (AI) elements for enhanced autonomy, optimizing energy efficiency, and expanding visual navigation capabilities through advanced computer vision technologies. The results confirm that the developed UAV system is a scalable, robust, and effective solution for executing complex missions in dynamically changing and hostile environments.

Keywords: UAV, flight controller, PID controller, GPS, EW, inertial navigation

Стаття надійшла до редакції / Received 01.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 16.5.2025

Вступ

Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) відіграють ключову роль у військових, наукових і цивільних сферах. Головними викликами є: забезпечення точного управління, стабільної навігації та безпечного зв'язку, особливо в умовах втрати сигналу Системи глобального позиціонування (GPS, Global Positioning System) або дії радіоелектронної боротьби (РЕБ). Мета цієї роботи полягає у створенні ефективної, доступної та захищеної системи управління й навігації для БПЛА середнього розміру.

Структура системи

Система управління та навігації складається з декількох функціональних блоків, кожен з яких виконує ключову роль у забезпеченні автономного, точного та надійного польоту БПЛА в умовах

реальних загроз. Нижче подано розширений опис складових системи, структурно-функціональна схема якої зображена на рис.1.

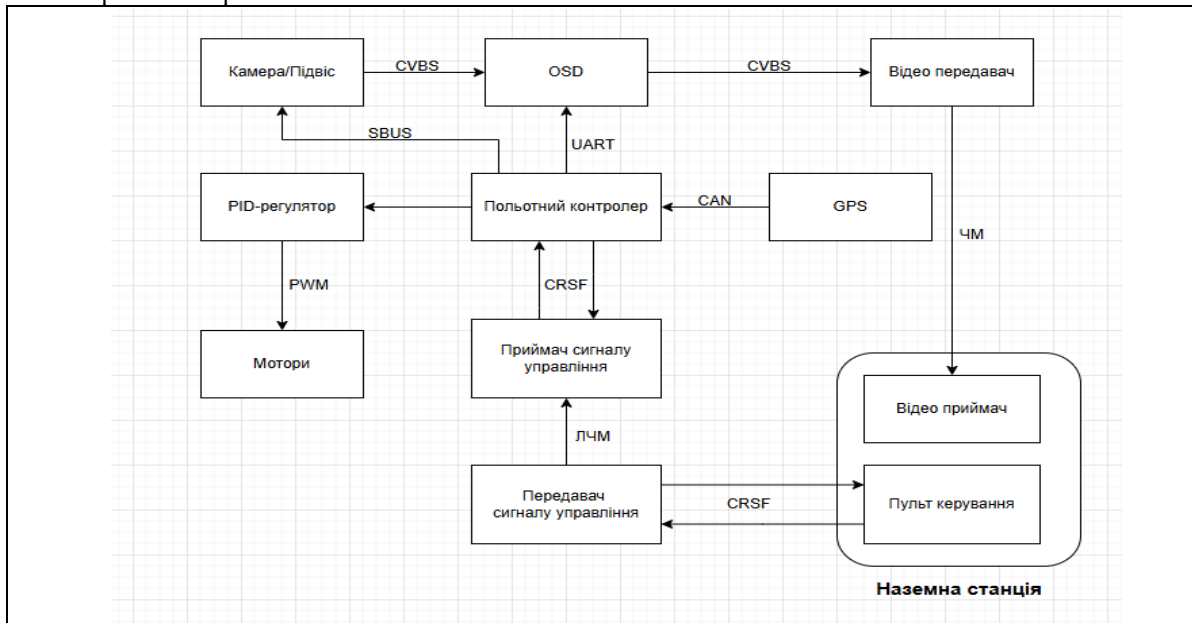


Рис. 1. Структурно-функціональна схема

Система управління та навігації складається з:

- польотного контролера Cube Orange Plus або Pixhawk6C – центрального обчислювального модуля, що виконує обробку даних з сенсорів, реалізацію алгоритмів стабілізації, планування маршруту та видачу команд виконавчим механізмам. Працює під керуванням відкритої платформи ArduPilot [1];
- навігаційного модуля GPS Here3+ із вбудованим компасом та захистом від GPS-спуфінгу – застосовується для отримання координат, висоти, швидкості та орієнтації в просторі. Містить екранування для блокування сигналів, що надходять знизу, та фільтрацію некоректних супутникових даних [2][3];
- PID (Proportional-Integral-Derivative)-регулятора – пропорційно-інтегрально-диференційного (ПІД) алгоритму, який керує стабільністю польоту шляхом автоматичної корекції положення і швидкості БПЛА відносно заданої траєкторії. Забезпечує точне утримання висоти, нахилів і швидкості [4];
- камери SIYI A8 – цифрової FPV (First Person View) камери з вбудованим стабілізованим підвісом, яка передає зображення в реальному часі та дає змогу оператору візуально оцінювати середовище. Управління виконується через протокол SBUS, що забезпечує зміну куту нахилу камери, зміну фокусної відстані (Zoom) та інші параметри [5];
- двигунів Hobbywing X8 – безколекторних моторів високої потужності, сумісних з електронними регуляторами швидкості (ESC, Electronic Speed Controller). Забезпечують необхідну тягу, маневреність і вантажопідйомність. Мають високу енергоефективність і призначені для тривалих польотів [6];
- каналу зв'язку CRSF/ELRS – цифрових протоколів, які забезпечують надійне двостороннє управління БПЛА. Застосовуються для передачі команд від пульта керування до приймача, встановленого на БПЛА, з мінімальною затримкою і високою частотою оновлення [7][8];
- телеметричного зв'язку через VTX TBS Unify Pro32 HV або інший потужний передавач (до 2500 мВт) – передає аналогове або цифрове відео, включаючи накладені дані телеметрії, на приймальний пристрій пілота. Працює на частоті 5,8 ГГц [9];
- Mini OSD (On-Screen Display) – модулю накладання телеметричної інформації (наприклад: напруга, висота, рівень сигналу) на відеосигнал, що транслюється оператору. Програмується із застосуванням MWOSD і отримує дані з польотного контролера через UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter);
- резервного джерела живлення – акумуляторної системи на основі двох батарей 6S 16P, що забезпечують напругу 50 В, а також перетворювачів постійного струму (DC-DC) для живлення периферійних пристроїв (камера, GPS, OSD) з напругою 5 В або 12 В.

Управління БПЛА

Управління БПЛА здійснюється із застосуванням пульта дистанційного керування Radiomaster TX16S, який підтримує сучасний цифровий протокол передачі даних CRSF. Передавач ELRS Micro TX забезпечує надійне двостороннє з'єднання з мінімальною затримкою, дозволяючи передавати керуючі сигнали та отримувати телеметричну інформацію. Сигнали управління передаються з пульта до

приймача, встановленого на борту БПЛА. Приймач передає ці сигнали на польотний контролер через UART, використовуючи високошвидкісний цифровий протокол CRSF або ELRS.

Польотний контролер обробляє отримані команди та виконує їх за допомогою електронних регуляторів швидкості, які управляють двигунами. Регулювання швидкості обертання двигунів здійснюється шляхом імпульсно-широтної модуляції (PWM, Pulse-Width Modulation), забезпечуючи плавне та точне реагування на зміни команд в різних режимах польоту. Крім того, підтримуються сучасні протоколи керування двигунами — DShot та OneShot, які забезпечують вищу точність та надійність. Польотний контролер також відповідальний за збирання, обробку та інтеграцію даних з усіх сенсорів: акселерометрів, гіроскопів, барометрів, GPS, компасу та камер. Це забезпечує повний цикл управління: від прийому команди до її реалізації у вигляді стабілізованого польоту. Режими польоту, що реалізуються польотним контролером, включають: AltHold (утримання висоти), PosHold (утримання позиції), Auto (автоматична місія) та RTL (автоматичне повернення до точки злету).

Навігація БПЛА

Навігація БПЛА є багаторівневою та передбачає використання кількох методів для забезпечення стабільного орієнтування у просторі. Основним джерелом координат є GPS, зокрема модуль Heme3+, який має вбудований компас і підтримує протоколи захисту від GPS-спуфінгу та глушіння. GPS-модуль забезпечує визначення широти, довготи, висоти, швидкості, напрямку руху та кількості супутників [2][3]. Для підвищення точності та стійкості навігації застосовуються інерційні вимірювальні блоки (IMU, Inertial Measurement Unit), що включають гіроскопи, акселерометри та барометри. Вони дають змогу БПЛА стабілізувати своє положення у просторі, навіть у разі втрати супутникового сигналу. Також застосовується компас для компенсації зовнішніх магнітних збурень.

Крім того, реалізована візуальна навігація із застосуванням FPV камери, яка дає змогу оператору орієнтувати БПЛА за допомогою відеозображення, а також OSD (On-Screen Display) для накладання критичних параметрів польоту — напруги, висоти, швидкості, рівня сигналу та режиму роботи. У випадках втрати GPS-сигналу, активується резервна функція навігації за азимутом: використовуючи останні відомі координати та вектор руху, польотний контролер автоматично розраховує напрямок на точку злету та скеровує БПЛА до неї. Цей підхід забезпечує можливість безпечно повернення БПЛА, навіть за відсутності зовнішніх навігаційних джерел. Усі дані передаються на польотний контролер по шині CAN або UART, що гарантує надійність зв'язку та можливість масштабування системи.

Захист зв'язку та передачі даних

Для захисту каналу зв'язку від засобів РЕБ впроваджено багаторівневі заходи. Основним елементом є застосування модемів sine.link, які підтримують широкий частотний діапазон (500–750 МГц, 864–894 МГц), що дозволяє уникнути фіксованих частот, які легко піддаються глушінню [10][11]. Модеми підтримують протокол LoRa, який забезпечує високу енергоефективність та стійкість до перешкод завдяки модуляції з розширеним спектром. Налаштування виконується через інтерфейс LinkApp.

Для передачі відеосигналу застосовується передавач VTX потужністю до 2500 мВт. Це забезпечує стійке відео-з'єднання, навіть на відстані понад 15 км. Підтримка кількох каналів і режимів потужності дає змогу адаптувати сигнал під умови ефіру. Крім того, телеметричні дані накладаються на відео-потік за допомогою Mini OSD і передаються до наземної станції. Завдяки цьому, пілот в режимі реального часу бачить параметри БПЛА: напругу живлення, висоту, швидкість, режим польоту, якість зв'язку тощо. Для моніторингу якості сигналу застосовується система Yaapu Telemetry, яка працює з протоколами CRSF та ELRS. Вона забезпечує пілота зручним графічним інтерфейсом прямо на екрані пульта керування (наприклад, TX16S) [1].

Таким чином, система зв'язку є надійною, адаптивною та здатною протистояти як активному глушінню, так і спробам перехоплення або підміни сигналів.

Режим польоту

- **AltHold** – режим утримання висоти на основі даних барометра. БПЛА стабілізує вертикальне положення, а пілот може керувати напрямком, нахилами та швидкістю. Режим є корисним для польотів у закритих приміщеннях або за відсутності GPS.
- **PosHold** – режим утримання горизонтального положення у просторі за допомогою GPS. Якщо пілот не чіпає стіки, БПЛА «зависає» у повітрі. При зміні стіків БПЛА рухається, а після зупинки – стабілізується в новій позиції. Режим надає високий рівень безпеки під час навігації в обмеженому просторі або при виконанні завдань з високою точністю позиціонування.
- **Auto** – повністю автономний режим, у якому БПЛА виконує заздалегідь запрограмовану місію. Завдання місії, такі як переліт по точках, фотографування або запуск корисного навантаження, задаються через програмне забезпечення Mission Planner. Автопілот виконує дії без участі оператора.
- **RTL (Return to Launch)** – режим автоматичного повернення до точки злету. Активується вручну або автоматично у разі втрати сигналу управління чи критичного рівня заряду. БПЛА піднімається на безпечну висоту, повертається по маршруту та здійснює посадку у визначеній точці. Цей режим є важливим елементом безпеки.

Усі режими підтримуються прошивкою ArduPilot та можуть гнучко налаштуватися відповідно до вимог місії.

Тестування здійснено в умовах радіоелектронної боротьби. БПЛА зберігав стабільність сигналу до 25 км, при цьому відео починало зникати після 18 км. Навігація залишалась стабільною завдяки кількості супутників та алгоритму повернення за азимутом. Захищений GPS продемонстрував ефективність проти GPS-спуфінгу. В режимі RTL БПЛА самостійно повертався до точки злету.

Реалізовано алгоритм автономного повернення без GPS, використовуючи останні координати та інерційну навігацію [13]. Внесені зміни в код ArduPilot [1]. Інтегровано модулі псевдовипадкового пере налаштування робочої частоти (ППРЧ) для телеметрії та зв'язку, підвищено надійність відео-зв'язку.

Висновки

У цій роботі описано підхід до створення системи управління і навігації БПЛА, придатної для роботи в умовах інтенсивної радіоелектронної боротьби. Основними здобутками є:

- успішна інтеграція класичних PID-регуляторів у структуру керування для досягнення точного стабілізованого польоту;
- реалізація адаптивної навігації з функцією повернення без GPS на основі векторного аналізу останніх координат;
- впровадження захищеного каналу зв'язку на основі протоколів LoRa, CRSF/ELRS та використання потужних відео-передавачів для стійкої передачі інформації;
- підтвердження стабільності роботи БПЛА під час польотів на великі дистанції (до 25 км), навіть за умов глушіння сигналів;
- застосування відкритої платформи ArduPilot, що забезпечує гнучкість та можливість подальшої модернізації системи.

Окрім досягнення поставлених технічних цілей, система підтвердила свою життєздатність під час реального випробування в умовах, наближених до бойових. Отримані результати свідчать про перспективність її використання не лише в оборонних сферах, але й у наукових дослідженнях, моніторингу навколишнього середовища, логістиці та рятувальних операціях.

Подальші дослідження можуть бути зосереджені на впровадженні елементів штучного інтелекту для покращення автономності, вдосконаленні енергоефективності системи, а також на розширенні можливостей візуальної навігації за допомогою комп'ютерного зору.

Таким чином, запропонована система є ефективним, доступним та масштабованим рішенням для створення сучасного надійного БПЛА, що здатен виконувати складні завдання у змінному та агресивному середовищі.

Література

1. ArduPilot. TBS RC [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-tbs-rc.html> (дата звернення: 07.05.2025).
2. Keysight. Testing Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Receivers [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.keysight.com/blogs/en/tech/rfmw/2022/08/23/testing-global-navigation-satellite-systems-gnss-receivers> (дата звернення: 07.05.2025).
3. GPS Here3+ [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://irlock.com/products/here3-with-istand> (дата звернення: 07.05.2025).
4. Proportional–Integral–Derivative Controller [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Proportional%E2%80%93integral%E2%80%93derivative> (дата звернення: 07.05.2025).
5. SIYI MANUAL [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://siyi.biz/en/index.php?id=downloads&asd=22> (дата звернення: 07.05.2025).
6. Hobbywing. XRotor X8108 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.hobbywing.com/en/products/xrotor-x8108> (дата звернення: 07.05.2025).
7. TBS. TBS CROSSFIRE R/C System [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.team-blacksheep.com/media/files/tbs-crossfire-manual.pdf> (дата звернення: 07.05.2025).
8. Моделістам. Що обрати: Crossfire чи ELRS? [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://modelistam.com.ua/ua/chto-vybrati-crossfire-elrs-a-291/> (дата звернення: 07.05.2025).
9. Team BlackSheep. Unify Pro 32 HV [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.team-blacksheep.com/products/prod:unifypro32_hv (дата звернення: 07.05.2025).
10. The Things Network. What is LoRaWAN? [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/> (дата звернення: 07.05.2025).
11. Okuhara, M., et al. Phased Array Radio Navigation System on UAVs: In-Flight Calibration. Oct. 2024.
12. Inertial Navigation Systems (INS) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/inertial-navigation-systems-ins-an-introduction> (дата звернення: 07.05.2025).

13. Спаський, Я.В., Бондаренко, В.М. Дослідження системи управління та навігації БПЛА // Тези Міжнародної наукової інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення», м. Тернопіль (Україна) – м. Ополе (Польща), 9–10 липня 2024 р. – С. 81–85. Режим доступу: <http://www.konferenciaonline.org.ua/us/article/id-1832/> (дата звернення: 07.05.2025).

References

1. ArduPilot. TBS RC [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-tbs-rc.html> (Data zvernennia: 07.05.2025).
2. Keysight. Testing Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Receivers [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://www.keysight.com/blogs/en/tech/rfmw/2022/08/23/testing-global-navigation-satellite-systems-gnss-receivers> (Data zvernennia: 07.05.2025).
3. GPS Here3+ [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://irlock.com/products/here3-with-istand> (Data zvernennia: 07.05.2025).
4. Proportional–Integral–Derivative Controller [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://en.wikipedia.org/wiki/Proportional%E2%80%93integral%E2%80%93derivative> (Data zvernennia: 07.05.2025).
5. SIYI MANUAL [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://siyi.biz/en/index.php?id=downloads&asd=22> (Data zvernennia: 07.05.2025).
6. Hobbywing. XRotor X8108 [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://www.hobbywing.com/en/products/xrotor-x8108> (Data zvernennia: 07.05.2025).
7. TBS. TBS CROSSFIRE R/C System [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://www.team-blacksheep.com/media/files/tbs-crossfire-manual.pdf> (Data zvernennia: 07.05.2025).
8. Modelistam. Shcho obraty: Crossfire chy ELRS? [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://modelistam.com.ua/ua/chto-vybrati-crossfire-elrs-a-291/> (Data zvernennia: 07.05.2025).
9. Team BlackSheep. Unify Pro 32 HV [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: https://www.team-blacksheep.com/products/prod:unifypro32_hv (Data zvernennia: 07.05.2025).
10. The Things Network. What is LoRaWAN? [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://www.thingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/> (Data zvernennia: 07.05.2025).
11. Okuhara, M., та ін. Phased Array Radio Navigation System on UAVs: In-Flight Calibration. Oct. 2024.
12. Advanced Navigation. Inertial Navigation Systems (INS) [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/inertial-navigation-systems-ins-an-introduction> (Data zvernennia: 07.05.2025).
13. Spaskiy, Y.V., Bondarenko, V.M. Doslidzhennya systemy upravlinnya ta navihatsiyi BPLA // Proceedings of the International Scientific Internet-Conference «Information Society: Technological, Economic and Technical Aspects of Formation», Ternopil (Ukraine) – Opole (Poland), 9–10 July 2024. – P. 81–85. Rezhym dostupu: <http://www.konferenciaonline.org.ua/us/article/id-1832/> (Data zvernennia: 07.05.2025).