

І. С. Кондіус, Л. Ю. Федік, Т. Ю. Голіков  
Луцький національний технічний університет

## АПАРАТНІ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БПЛА: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО РІШЕННЯ

У статті розглядаються найбільш оптимальні апаратні платформи для керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Аналізуються ключові аспекти вибору контролерів польоту, включаючи продуктивність, підтримку периферійних пристроїв, енергоспоживання та сумісність із системами реального часу. Особливу увагу приділено стабільності живлення та можливостям інтеграції з датчиками, камерами й комунікаційними модулями. Оцінюється придатність платформ ESP32, Teensy 4.1 та STM32 «Blue Pill» для складних дронів, порівняно з альтернативними рішеннями, такими як Raspberry Pi, Arduino Uno та BeagleBone Black. Робиться висновок щодо необхідності якісного проєктування живлення для забезпечення стабільності й ефективності роботи дрона.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, керуюча плата, стабільність живлення, RTOS, периферія, ШІМ, датчики, телеметрія, ESP32, Teensy 4.1, STM32, Raspberry Pi, Arduino, енергоспоживання, розширюваність, польотна система.

I.S. Kondius, L. Yu. Fedik, T. Yu. Holikov

## HARDWARE PLATFORMS FOR AUTOMATED UAV CONTROL: COMPARATIVE ANALYSIS AND OPTIMAL SOLUTION SELECTION

This article examines the most optimal hardware platforms for controlling unmanned aerial vehicles (UAVs). It explores essential factors in selecting flight controllers, including computational performance, peripheral support, energy efficiency, and real-time operating system (RTOS) compatibility. Special emphasis is placed on power stability, integration with sensors, cameras, and communication modules, and ensuring seamless operation in challenging conditions. The suitability of ESP32, Teensy 4.1, and STM32 «Blue Pill» for advanced drone applications is assessed, comparing them with alternatives like Raspberry Pi, Arduino Uno, and BeagleBone Black. The analysis highlights the advantages and limitations of each platform in terms of power management, connectivity, and responsiveness. The conclusion underscores the necessity of proper power system design, including high-quality voltage regulators such as UBEC and PDB, to ensure flight stability and efficiency.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, flight controller, power stability, RTOS, peripherals, PWM, sensors, telemetry, ESP32, Teensy 4.1, STM32, Raspberry Pi, Arduino, energy efficiency, expandability, flight system.

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) особливу роль відіграє автоматизована система керування, що забезпечує стабільність польоту, продуктивність, ефективне енергоспоживання та інтеграцію з периферійними пристроями. Для досягнення оптимальної роботи таких систем необхідно вибрати апаратну платформу, яка відповідатиме технічним вимогам та забезпечуватиме реалізацію алгоритмів керування в реальному часі.

Основною проблемою є збалансування обчислювальної потужності, енергоефективності та розширюваності платформи. В умовах автоматизованого керування критично важливо враховувати сумісність апаратної частини з операційними системами реального часу (RTOS), що забезпечують стабільну роботу польотних алгоритмів, а також підтримку високошвидкісної обробки даних від сенсорів та модулів зв'язку [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останні дослідження в галузі бортового обладнання та методів керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) охоплюють важливі аспекти, які впливають на ефективність та надійність їх роботи.

Дослідження військової академії Одеси (Маміч В. та ін., 2023) зосереджується на аналізі конструкції та функціональності систем навігації, телеметрії, зв'язку та управління. Значну увагу приділено стабільності живлення та інтеграції сенсорів, що забезпечує коректну роботу апаратів у складних умовах експлуатації [2].

Робота Державного науково-дослідного інституту авіації (Самойленко О. В. та ін., 2021) досліджує механізми управління групами БПЛА, включаючи алгоритми автоматичного керування та координацію з пілотованими апаратами. Визначено ключові аспекти ефективності групового польоту, особливо щодо синхронізації та обміну даними між дронами [3].

У публікації дослідників Львівської політехніки (Микийчук М. М., Зіганшин Н. С., 2019) акцентується увага на методах автономної навігації та стандартизації управління. Розглянуто перспективи розвитку технологій, що сприятиме підвищенню ефективності безпілотних систем [4].

Актуальні наукові роботи та розробки у сфері автоматизованого керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) акцентують увагу на ролі операційних систем реального часу (RTOS), що забезпечують стабільність і продуктивність автономних польотів.

Компанія Espressif представила ESP-Drone, що реалізує прошивку для квадрокоптерів на базі ESP32 ([Espressif Systems](#)). Проект підтримує стабілізацію, утримання висоти, позиціонування, а також інтеграцію з мобільними додатками та джойстиком. Завдяки використанню FreeRTOS платформа забезпечує точне управління та швидку обробку даних від сенсорів і модулів зв'язку [5].

Обстеження інтеграції ядра FreeRTOS на платформі Teensy 4.1, яка базується на ARM Cortex-M7 ([Sandmann T., GitHub](#)) зосереджені на налаштуванні параметрів ядра, оптимізації енергоефективності та підвищенні продуктивності у реальному часі, що критично важливо для керування автономними БПЛА [6].

Ці дослідження демонструють тенденцію до застосування RTOS у керуванні безпілотними апаратами, що сприяє підвищенню стабільності польотних алгоритмів, ефективності обробки даних та розширенню можливостей інтеграції з периферійними пристроями.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є порівняльний аналіз апаратних платформ для автоматизованого керування БПЛА, визначення найбільш збалансованих рішень з точки зору продуктивності, енергоспоживання та сумісності з RTOS. Також розглядається роль стабільного живлення та способи його оптимізації у польотних системах.

Процес створення індивідуального дрона передбачає ретельний вибір апаратної платформи, адже саме вона визначає швидкість реагування системи, можливість інтеграції датчиків, комунікаційні функції та загальну стабільність польоту.

Залежно від вимог до продуктивності, керування в реальному часі та можливостей бездротового зв'язку, розробники обирають різні типи плат. Деякі платформи забезпечують високий рівень обчислювальної потужності та сумісність із периферійними пристроями – такими як GPS, інерційні вимірювальні одиниці (IMU) чи драйвери двигунів, що є ключовими компонентами в повітряній робототехніці [7; 8].

Неправильний вибір апаратної платформи може призвести до затримок в обробці даних, нестабільності польоту або обмежень у подальшій модифікації та розширенні функціоналу дрона. Враховуючи широкий вибір доступних апаратних рішень – від Arduino для початкового рівня до STM32 та ESP32 для професійних проєктів – важливо провести порівняльний аналіз їхніх характеристик.

Для успішної інтеграції керуючої плати у саморобний дрон необхідно враховувати технічні характеристики периферійних пристроїв, із якими вона взаємодіє. Регулятори швидкості двигунів (ESC) підтримують різні протоколи керування, такі як PWM, OneShot або DShot. Вони працюють у широкому діапазоні напруг – від 5 до 25 вольт, а їхні струмові показники можуть сягати 20–60 ампер, забезпечуючи плавне й точне регулювання обертів безщіткових двигунів. Важливо, щоб плата керування могла передавати сигнали до ESC у відповідному форматі для коректного управління [7; 9].

Інерційні вимірювальні блоки (IMU), що складаються з тривісних гіроскопів, акселерометрів і магнітометрів, забезпечують критично важливі дані про орієнтацію та рух дрона. Найпоширеніші модулі, такі як MPU-6050 або MPU-9250, використовують інтерфейси I2C або SPI і мають частоту оновлення до 1000 Гц, що дозволяє отримувати точні та швидкі показники для стабілізації польоту.

Для визначення положення у просторі використовуються GPS-модулі, які зазвичай працюють через UART або I2C інтерфейси. Популярні моделі, такі як Ublox NEO-6M або NEO-M8N, забезпечують точність позиціонування близько 2,5 метра і підтримують оновлення координат з частотою від одного до десяти разів на секунду. Вони також сумісні з супутниковими системами GLONASS, Galileo та SBAS, що дозволяє підвищити надійність сигналу.

Камери часто інтегруються у дрони для потокової передачі відео та розпізнавання об'єктів. Модулі на базі OV2640 або Raspberry Pi Camera Module V2 підключаються через SPI, USB або CSI інтерфейси та можуть забезпечувати роздільну здатність від VGA до HD. Це дозволяє

використовувати їх як для базового відеоспостереження, так і для складних систем обробки зображень.

Телеметричні системи, що застосовуються для дистанційного контролю та передачі даних, зазвичай працюють на частотах 433 МГц або 2,4 ГГц і використовують протоколи MAVLink, FrSky чи SBUS. Вони підключаються через UART або SPI і можуть забезпечувати зв'язок на відстані від кількох сотень метрів до декількох кілометрів, що є критично важливим для безпечного керування дроном на великій дистанції [1-4; 8-10].

Таким чином, вибір плати керування для кастомного дрона має враховувати не лише її власні технічні можливості, а й сумісність із ключовими периферійними пристроями. Збалансоване поєднання апаратних характеристик та периферії гарантує надійну роботу, стабільність польоту та ефективне виконання поставлених завдань, що особливо важливо при створенні власної безпілотної системи.

У рамках дослідження для порівняння було обрано кілька найбільш поширених плат розробки, орієнтованих на їхню актуальність у сфері самостійного конструювання дронів.

До аналізу були обрані найпоширеніші платформи, що мають актуальність у сфері самостійного конструювання дронів.

Зокрема: 1. Arduino Uno – популярна плата початкового рівня, що відзначається простотою використання та широкою популярністю в освітньому середовищі;

2. ESP8266 та ESP32 – мікроконтролери з інтегрованим бездротовим зв'язком, що забезпечують вдаль поєднання вартості та обчислювальної продуктивності;

3. Teensy 4.1 – високопродуктивна плата з підтримкою керування в режимі реального часу, що підходить для систем із підвищеними вимогами до швидкості обробки сигналів;

4. STM32 «Blue Pill» – недорога плата на базі мікроконтролера промислового класу, яка часто застосовується в системах керування польотом;

5. Raspberry Pi 4 – одноплатний комп'ютер із високою обчислювальною потужністю, розширеними можливостями підключення периферії та підтримкою ОС Linux;

6. BBC micro:bit – навчальна платформа з вбудованими датчиками та спрощеним середовищем програмування, орієнтована на освітні цілі;

7. Particle Photon – мікроконтролер, оптимізований для IoT-рішень із хмарною інтеграцією;

8. BeagleBone Black – потужна плата для вбудованих систем, що підтримує запуск Linux і пропонує широкі комунікаційні можливості.

Кожна з представлених платформ має власні переваги та обмеження, що робить їх доцільними для порівняльної оцінки у сфері розробки безпілотних літальних апаратів.

Простота налаштування та інтеграції є одним із ключових чинників у розробці дронів, особливо в індивідуальних або експериментальних проєктах, де важливими залишаються швидке прототипування та надійне з'єднання компонентів.

Плати, що полегшують підключення основних модулів – таких як регулятори швидкості, сенсори та комунікаційні інтерфейси – дають змогу скоротити час підготовки системи, зменшити ймовірність помилок у схемі з'єднань та зосередитися на розробці логіки польоту й етапах тестування. Такий рівень доступності особливо важливий для окремих розробників або невеликих команд, які працюють в умовах обмеженого часу та ресурсів.

Arduino Uno легко налаштувати за допомогою Arduino IDE та має просту систему контактів, однак підключення кількох компонентів, специфічних для дронів (таких як регулятори рівня електроніки, гіроскопи та приймачі радіокерування), потребує зовнішніх бібліотек та ручного налаштування. Це зумовлено відсутністю вбудованих протоколів зв'язку, таких як мультіплексування CAN [12].

ESP8266 трохи складніший у налаштуванні, ніж Arduino Uno, оскільки часто потребує драйверів USB-to-Serial та налаштувань Wi-Fi. Він підтримує базову інтеграцію з датчиками та регуляторами рівня електроніки, проте обмежена кількість контактів та спільна функціональність ускладнюють підключення та налаштування програмного забезпечення для багатомодульних дронів [13].

ESP32 пропонує вбудовані Wi-Fi та Bluetooth і легко програмується через середовища Arduino або ESP-IDF. Він підтримує широкий спектр датчиків та модулів, а двоядерна архітектура спрощує керування польотом, телеметрією або потоками камер, мінімізуючи конфлікти на рівні коду [14].

Teensy 4.1 добре інтегрується через Arduino IDE та підтримує великий набір бібліотек датчиків, проте його висока швидкість та численні функції можуть здатися складними для початківців. Водночас він пропонує виняткову гнучкість для розширеної інтеграції з регуляторами рівня (ESC), інерційними вимірювальними блоками (IMU) та GPS-пристроями, особливо коли потрібна точність синхронізації [15].

STM32 «Blue Pill» має круту криву навчання, що вимагає використання таких інструментів, як STM32CubeIDE або PlatformIO з прошивкою ST-Link. Хоча ця плата дуже потужна та модульна, початкове налаштування (завантажувач, драйвери, прошивка) часто є перешкодою для звичайних користувачів або швидкого створення прототипів [16].

Raspberry Pi 4 працює під управлінням повноцінної операційної системи, тому налаштування включає прошивку SD-карти та конфігурацію Linux, що є складнішим порівняно з мікроконтролерними платами. Підключення ESC або гіроскопів потребує програмування GPIO або розширення UART, що робить його найкращим співпроцесором, а не контролером польоту [17].

BBC micro:bit орієнтований на початківців і відзначається простотою налаштування через редактори MakeCode або Python, проте він має дуже обмежену кількість контактів і не підтримує стандартні інтерфейси зв'язку для компонентів дрона. Це значно ускладнює серйозну інтеграцію без додаткових роз'ємів або адаптерів.

Particle Photon орієнтований на хмарні технології та легко налаштовується через Particle Web IDE або CLI, однак ця простота досягається ціною гнучкості. Локальна інтеграція з компонентами дрона обмежена і зазвичай вимагає спеціальної прошивки, а для уникнення проблем із затримкою її потрібно використовувати лише локально.

BeagleBone Black потребує конфігурації Linux та часто складного налаштування периферійних пристроїв (накладання дерева пристроїв, конфігурація плащів). Він потужний, але інтеграція з компонентами реального часу, такими як ESC та датчики, займає багато часу без глибоких знань Linux та апаратного забезпечення [18-20].

Різні мікроконтролери та одноплатні комп'ютери мають різний ступінь придатності до використання у системах безпілотних літальних апаратів.

Arduino Uno підходить для простих проєктів, адже вирізняється легкістю освоєння, проте має обмеження через відсутність вбудованих протоколів бездротового зв'язку.

ESP8266 та ESP32 забезпечують інтегровану Wi-Fi-комунікацію, однак ESP32, завдяки двоядерній архітектурі та більшій обчислювальній потужності, краще пристосований до складних задач.

Teensy 4.1 та STM32 відзначаються високою продуктивністю та точністю роботи у режимі реального часу, проте їх використання потребує глибшого розуміння апаратних інтерфейсів.

Raspberry Pi 4, BeagleBone Black та Particle Photon частіше застосовуються як співпроцесори або периферійні вузли через затримки в роботі з низькорівневим обладнанням або складність первинного налаштування [12; 15; 17].

У свою чергу, BBC micro:bit найкраще підходить для освітніх цілей, однак не забезпечує достатнього рівня продуктивності чи функціональної гнучкості для практичного використання у дронах.

Одним із ключових чинників у процесі створення індивідуального безпілотника є сумісність апаратних компонентів. Контролер польоту має безперешкодно взаємодіяти з такими елементами, як регулятори швидкості (ESC), інерційні вимірювальні модулі (IMU), GPS-приймачі, модулі радіокерування та камери.

Недостатня підтримка або несумісність між платою та периферією може спричинити перебої у зв'язку, нестабільну поведінку дрона під час польоту або навіть фізичне пошкодження обладнання.

Вибір плати з широкою апаратною сумісністю дає змогу покращити інтеграцію, зменшити потребу у додаткових адаптерах та спростити розробку програмного забезпечення. Це, у свою чергу, підвищує надійність і безпеку експлуатації пристрою.

Arduino Uno підтримує базову широтно-імпульсну модуляцію (ШИМ) для керування двигунами та прості датчики I2C/SPI, такі як гіроскопи або GPS-модулі. Однак його обмежені можливості вводу/виводу та пам'яті часто вимагають зовнішніх драйверів, таких як PCA9685, для керування більш ніж двома двигунами або складними сенсорними масивами [12].

ESP8266 пропонує обмежені можливості GPIO та ШІМ, що робить його придатним лише для дуже простих дронів. Він підтримує I2C та SPI, але не має спеціальної підтримки камери і має проблеми з одночасним підключенням компонентів [13].

ESP32 має високу сумісність із компонентами дронів, пропонуючи кілька каналів ШІМ, апаратні таймери, підтримку IMU та GPS через I2C/SPI/UART. Він також має вбудовану інтеграцію камери для модулів, таких як OV2640, що робить його ідеальним як для керування польотом, так і для телеметрії [14].

Teensy 4.1 вирізняється великою кількістю високоточних ШІМ-виходів, а також надійною підтримкою датчиків через UART, I2C та SPI. Крім того, він сумісний із протоколами RC, такими як SBUS та PPM. Обмежена підтримка камер доступна через USB або спеціальне підключення [15].

STM32 «Blue Pill» пропонує потужні апаратні таймери та ШІМ, вбудовану підтримку всіх поширених датчиків дронів та GPS через кілька інтерфейсів. Також він сумісний із передовими протоколами RC, що робить його відмінним варіантом для систем керування польотом у реальному часі [16].

Raspberry Pi 4 не має вбудованої ШІМ для керування двигуном, але підтримує більшість датчиків через I2C, SPI та UART. Він особливо потужний для візуальної обробки завдяки вбудованій підтримці камери CSI, хоча керування в реальному часі потребує зовнішніх модулів та ретельного налаштування ОС [17].

BBC micro:bit забезпечує мінімальний інтерфейс ШІМ та датчиків і має обмежену підтримку драйверів двигунів. Відсутність входу для камери робить його непридатним для дронів, окрім демонстраційних проєктів у навчальних класах [21].

Particle Photon підтримує базові протоколи ШІМ та стандартні протоколи датчиків, але його хмарно-орієнтований дизайн та обмежена кількість GPIO роблять його непрактичним для прямого керування двигуном або кількома датчиками в автономних дронах [22].

BeagleBone Black має розширені можливості ШІМ та вводу/виводу, що дозволяє інтегрувати двигуни й датчики. Він також підтримує камери через USB або модулі розширення, хоча складність налаштування та архітектура на базі Linux створюють труднощі для виконання завдань реального часу [23].

ESP32, STM32 та Teensy 4.1 вважаються найбільш функціональними платформами для реалізації систем керування польотом безпілотною. Вони забезпечують розширені можливості керування завдяки широтно-імпульсній модуляції (ШІМ), підтримують широкий спектр сенсорів та сумісні з камерами, що є важливим для автономних функцій.

Натомість Arduino Uno та ESP8266 мають обмежену кількість входів/виходів та менш гнучкі можливості підключення, що ускладнює їх використання у складніших конфігураціях. Raspberry Pi 4 демонструє високу продуктивність у задачах комп'ютерного зору та обробки зображень, проте поступається в задачах реального часу через відсутність детермінованої затримки.

BBC micro:bit та Particle Photon мають обмежені апаратні ресурси й орієнтовані переважно на навчальні або IoT-проєкти, що знижує їхню придатність для автономного дронабудування. BeagleBone Black, хоча й пропонує значну обчислювальну потужність, характеризується складністю конфігурації та потребою в глибоких знаннях операційної системи [12; 14-17; 22-23].

Розширюваність і модульність є ключовими аспектами при створенні дронів на замовлення, оскільки вони забезпечують адаптацію системи до змінних вимог проєкту. Модульна архітектура спрощує інтеграцію або заміну компонентів – зокрема GPS-модулів, додаткових сенсорів, камер чи телеметричних систем – без потреби повного перегляду всієї апаратної конфігурації.

Така гнучкість не лише полегшує впровадження майбутніх оновлень, але й спрощує процес налагодження, технічного обслуговування та масштабування від базового прототипу до складної багатофункціональної платформи.

Arduino Uno пропонує базові можливості розширення за допомогою екранів та перемичок, однак обмежена кількість контактів GPIO та пам'яті зменшує кількість модулів (наприклад, датчиків, дисплеїв, світлодіодів), які можна підключити одночасно без мультиплексування [12].

ESP8266 має невелику кількість GPIO та часто використовує спільні контакти між функціями (наприклад, флеш-пам'ять та I<sup>2</sup>C), що значно обмежує можливості розширення. Він краще підходить для мінімальних налаштувань або використання в парі з розширювачами вводу/виводу [13].

ESP32 є високомодульною платформою з великою кількістю контактів GPIO, кількома шинами I<sup>2</sup>C та SPI, апаратним ШІМ, а також вбудованою підтримкою Bluetooth та Wi-Fi. Вона дозволяє легко інтегрувати додаткові модулі, такі як дисплеї, телеметричні радіостанції та датчики навколишнього середовища [14].

Teensy 4.1 забезпечує велику кількість цифрових та аналогових контактів вводу/виводу, кілька UART та сумісність із бібліотеками Arduino, що робить її однією з найбільш розширюваних платформ для прецизійних дронів та мультисенсорних систем [15].

STM32 «Blue Pill» підтримує широке розширення периферійних пристроїв через I<sup>2</sup>C, SPI, UART та CAN, проте не має стандартизованих розширень plug-and-play. Вона вимагає глибшого налаштування прошивки, але може масштабуватися до складних модульних архітектур дронів [16].

Raspberry Pi 4 пропонує USB, GPIO, I<sup>2</sup>C, SPI, UART, CSI/DSI та 40-контактний роз'єм, підтримуючи широкий спектр доповнень та HAT. Це включає LiDAR, камери, модулі телеметрії та навіть співпроцесори, хоча розподіл живлення та керування GPIO потребують особливої обережності [17].

BBC micro:bit розроблений для базового розширення освітніх можливостей за допомогою периферійних роз'ємів та плат. Він обмежений простими доповненнями, такими як світлодіоди або невеликі датчики, і не підходить для модульних систем дронів [121].

Particle Photon дозволяє помірне розширення за допомогою роз'ємів та хмарно-сумісних бібліотек, проте має обмежену кількість контактів і краще підходить для завдань Інтернету речей, ніж для складного розширення в реальному часі з кількома модулями, пов'язаними з польотом [22].

BeagleBone Black має велику кількість контактів вводу/виводу та вбудовану підтримку складних розширень за допомогою плат розширення (кейпів), що робить його дуже модульним. Однак його складність та накладні витрати Linux можуть ускладнити реалізацію цього потенціалу в умовах польоту [23].

Різні апаратні платформи мають варіативну підтримку розширення. ESP32, Teensy 4.1 та Raspberry Pi 4 забезпечують високу гнучкість завдяки великій кількості входів/виходів, підтримці інтерфейсів (I<sup>2</sup>C, SPI, UART) та сумісності з численними зовнішніми модулями.

Натомість Arduino Uno та ESP8266 обмежені кількістю доступних пінів, обсягом пам'яті та обчислювальними ресурсами, що ускладнює масштабування проекту. STM32 та BeagleBone Black мають значний потенціал розширення та масштабування, проте вимагають глибшого розуміння архітектури та складнішого програмного налаштування.

BBC micro:bit та Particle Photon більше орієнтовані на навчальні або хмароорієнтовані проекти з обмеженою кількістю підключених модулів, тому не підходять для комплексних систем із багатокомпонентною структурою [12-15; 17].

Підтримка спільноти та якісна документація відіграють ключову роль у розробці дронів на замовлення, особливо на етапах інтеграції численних апаратних компонентів і датчиків.

Платформи з активною спільнотою користувачів та детальною технічною документацією забезпечують доступ до прикладів реалізації, бібліотек, інструкцій із підключення, а також рішень типових проблем. Така підтримка значно скорочує час розробки, знижує поріг входження та полегшує усунення непередбачуваних технічних складностей.

Для індивідуальних розробників або малих команд подібна інфраструктура знань часто є вирішальним фактором, що відрізняє успішний функціональний прототип від проекту, який зупинився на етапі налагодження [7].

Arduino Uno має одну з найбільших та найактивніших спільнот у світі вбудованих систем, із тисячами навчальних посібників, бібліотек та форумних тем, що охоплюють усе: від базового керування двигуном до повноцінних проектів дронів. Це робить платформу ідеальним вибором для початківців та викладачів [12].

ESP8266 підтримується активною онлайн-спільнотою, що має широку документацію, бібліотеки та проекти з відкритим кодом. Хоча він менш досконалий порівняно з Arduino, на форумах таких як GitHub та Stack Overflow, доступно багато посібників та виправлень, пов'язаних із дронами [13].

ESP32 має переваги як від офіційної документації Espressif, так і від активної спільноти розробників. Підтримка є широкою, включаючи навчальні посібники, орієнтовані на дрони,

прикладі завдань у реальному часі, а також повну інтеграцію прошивки автопілота, наприклад за допомогою форків FreeRTOS або ArduPilot [14].

Teensy 4.1 має спеціалізовану та обізнану базу користувачів, чудову офіційну документацію та добре підтримуваний форум. Платформа сумісна з Arduino IDE, а бібліотеки, що надаються спільнотою, часто відповідають або перевершують офіційні за якістю [15].

STM32 «Blue Pill» має сильну підтримку у спільнотах вбудованих систем та аматорів, проте налаштування може бути складним через невідповідність сторонніх навчальних посібників. Офіційна документація від ST є вичерпною, але складною, часто вимагаючи попереднього досвіду для навігації [16].

Raspberry Pi 4 не має собі рівних за розміром спільноти серед одноплатних комп'ютерів, з незліченною кількістю навчальних посібників, бібліотек та інструментів plug-and-play. Хоча він не є мікроконтролером, його широко використовують у дронах для супутніх завдань, таких як комп'ютерний зір та навігація, завдяки багатій документації [17].

BBC micro:bit має відмінну документацію для освітніх цілей, із великою кількістю матеріалів для початківців та планами уроків. Проте йому бракує глибини для специфічних застосувань у дронах або розширеного апаратного інтерфейсу [21].

Particle Photon має офіційну документацію, зосереджену на хмарній інтеграції, та активну, але меншу спільноту розробників. Хоча допомога доступна для загальних проєктів Інтернету речей, ресурсів, специфічних для дронів, мало [22].

BeagleBone Black має сильну, але нішеву підтримку, із детальною офіційною документацією та деякими академічними й промисловими варіантами використання. Спільнота менша та більш технічна, що ускладнює для аматорів пошук доступних матеріалів, пов'язаних із дронами [23].

Arduino Uno має найбільшу підтримку спільноти, що робить цю платформу особливо привабливою для початківців. ESP32 також користується активною підтримкою, зокрема у спільнотах, що займаються розробкою дронів.

Teensy 4.1 та STM32 мають менші, проте більш спеціалізовані та технічно кваліфіковані спільноти користувачів, що забезпечує глибоку технічну підтримку, орієнтовану на вбудовані системи та прецизійні проєкти.

Raspberry Pi 4 вирізняється широкою базою навчальних ресурсів, орієнтованих на задачі вищого рівня, зокрема обробку зображень та складні обчислювальні процеси.

Інші платформи, такі як BBC micro:bit та Particle Photon, мають обмежену або нішеву підтримку, що ускладнює їх використання в контексті дронобудування [12; 15-17; 19].

Вибір апаратної платформи для кастомного дрона значною мірою залежить від вартості та доступності обладнання, адже ці фактори впливають на масштабованість проєкту та його економічну ефективність.

Доступні за ціною плати знижують фінансові ризики, пов'язані з відмовами обладнання або багаторазовим ітеративним проєктуванням. Це робить експерименти доступнішими для розробників з обмеженим бюджетом. Крім того, широка доступність дозволяє оперативно придбати запасні частини, що є критично важливим у випадках термінового складання або польових ремонтів.

У таких регіонах, як Україна та Європа, місцеві ціни та терміни доставки можуть суттєво впливати на швидкість реалізації проєкту та його загальну рентабельність [2; 7-8].

Arduino Uno: широко доступний як в оригінальному вигляді (500–800₴ / €12–€18), так і в клонах (250–400₴ / €6–€10). Продається на Prom.ua, AliExpress, TME та у місцевих реселерів освітнього обладнання [24-26].

ESP8266 (NodeMCU/Wemos D1 Mini): один із найдешевших варіантів (100–180₴ / €2,5–€5), доступний на AliExpress, MakersLab та в магазинах ЄС для любителів.

ESP32: коштує від 180 до 350₴ / €5–€9, залежно від типу модуля (ESP32-WROOM, WROVER тощо), доступний на Prom.ua, TME та RadioChip.

Teensy 4.1: має помірну ціну (1000–1300₴ / €24–€32). Хоча ця плата не так широко представлена в місцевих магазинах, її можна придбати через PJRC, Mouser або Digi-Key, з швидкою доставкою з ЄС.

STM32 «Blue Pill»: дуже доступна (100–200₴ / €3–€6), часто постачається зі складів ЄС або AliExpress. Якість може варіюватися, але вона залишається одним із найкращих виборів за співвідношенням ціна-продуктивність для досвідчених користувачів.

Raspberry Pi 4 стабільно доступна, а її ціна варіюється від 2500 до 4000€ / €55–€85 залежно від версії оперативної пам'яті (від 2 ГБ до 8 ГБ). Придбати можна на Brain, Prom.ua, а також у прямих постачальників з ЄС, таких як ThePiHut та Reichelt.

BBC micro:bit продається в Україні за 550–750€ / €13–€18. Комплекти доступні через освітні дистриб'ютори та офіційні канали ЄС, хоча він не є оптимальним варіантом для використання у дронах.

Particle Photon коштує 550–800€ / €14–€20, але його важко знайти локально. Найчастіше імпортується через дистриб'юторів Digi-Key або SparkFun у ЄС, проте рідко зустрічається в українських магазинах виробників.

BeagleBone Black має ціну 2200–3000€ / €50–€70, залежно від версії та постачальника. Він доступний у ЄС через Mouser, Farnell, а іноді і через Prom.ua, хоча терміни доставки зазвичай довші.

Серед розглянутих платформи ESP8266 та STM32 «Blue Pill» є найдоступнішими, їх легко придбати на популярних маркетплейсах. Arduino Uno та ESP32 також широко представлені на ринку, пропонуючи великий вибір оригінальних і сумісних плат-клонів.

Натомість Teensy 4.1 та Particle Photon є менш поширеними і мають вищу ціну, тоді як Raspberry Pi 4 та BeagleBone Black відносяться до преміального сегменту, що ускладнює логістику та збільшує терміни доставки.

BBC micro:bit займає середній ціновий діапазон, але здебільшого орієнтований на освітні цілі, а не на серйозне застосування у дронах [24–26].

Стабільність роботи дронів у різноманітних умовах навколишнього середовища є критично важливою через високу динамічність експлуатації. Контролер польоту має забезпечувати надійне функціонування в умовах вібрації, коливань живлення та змін параметрів середовища, таких як температура та висота.

Окрім цього, обробка даних у режимі реального часу гарантує миттєву реакцію на керуючі сигнали, включаючи регулювання двигунів, інтеграцію датчиків та стабілізацію платформи. Якщо плата не відповідає цим вимогам, це може спричинити затримки в обробці, нестабільність польоту або навіть аварійні збої, що робить ці критерії визначальними при виборі обладнання для кастомних дронів [1].

Arduino Uno має низьке енергоспоживання, що робить його механічно придатним для використання на дронах. Однак йому бракує операційної системи реального часу (RTOS), а його обмежена швидкість обробки (16 МГц) може призвести до повільних або нестабільних циклів керування у складних сценаріях польоту [12].

ESP8266 також компактний та енергоефективний, проте чутливий до коливань живлення і не забезпечує справжньої обробки в реальному часі. Він не ідеально підходить для багатозадачності або точної синхронізації у польоті [13].

ESP32 є високоефективною платформою, розробленою із режимами низького енергоспоживання та стійкістю до електромагнітних перешкод. Підтримує двоядерну обробку та FreeRTOS, що робить його оптимальним вибором для завдань реального часу, таких як PID-регулювання, об'єднання датчиків та телеметрія, навіть під навантаженням процесора в повітрі [14].

Teensy 4.1 є однією з найкращих платформ для роботи в реальному часі завдяки високій швидкості (600 МГц), низькій затримці та легкій конструкції. Вона чудово підходить для точної стабілізації польоту та обробки даних датчиків у режимі реального часу. Однак через високу швидкість роботи вона вимагає стабільного живлення та ретельного заземлення [15].

STM32 «Blue Pill» – це надійна плата, здатна працювати в режимі реального часу завдяки програмуванню на голому залізі або використанню RTOS (наприклад, ChibiOS). Вона забезпечує точне керування часом, добре працює в умовах вібрації та може одночасно обробляти потоки даних від кількох датчиків, що робить її ідеальним вибором для вимогливих дронів [16].

Raspberry Pi 4 – потужна платформа, проте вона не безпечна для роботи в реальному часі через операційну систему Linux. Плата енергоємна, важча та може знижувати продуктивність при нагріванні. Вона чудово підходить як супутня плата для завдань комп'ютерного зору або картографування, але ненадійна для прямого керування двигуном без зовнішніх мікроконтролерів [17].



BBC micro:bit є легким та енергоефективним, проте його обчислювальні можливості недостатні для роботи в реальному часі. Він здебільшого використовується для демонстрацій у класі або для надпростих дронів, таких як судна на повітряній подушці [21].

Щодо оцінки платформ для керування польотом у реальному часі, то Particle Photon є компактним та енергоефективним, проте не призначений для критичної продуктивності в реальному часі. Він може мати затримку під час повторного підключення до Wi-Fi або хмарних функцій, що ризиковано для систем польоту [22].

BeagleBone Black, як і Raspberry Pi 4, базується на Linux, але має PRU (програмовані пристрої реального часу), що робить його краще пристосованим для керування в режимі реального часу. Однак він відносно важкий і складний, тому найкраще підходить для великих дослідницьких платформ БПЛА, а не хобі-дронів [15].

Серед розглянутих платформ найбільш придатними для задач реального часу в управлінні дроном є ESP32, Teensy 4.1 та STM32 «Blue Pill», які забезпечують достатню обчислювальну потужність, підтримку RTOS (Real-Time Operating System) та мінімальні затримки.

Arduino Uno та ESP8266 підходять переважно для простих завдань і не справляються з високими навантаженнями в реальному часі.

Raspberry Pi 4 та BeagleBone Black, через використання загальнопризначених операційних систем, мають обмеження у задачах реального часу, але можуть ефективно виконувати допоміжні обчислювальні функції.

BBC micro:bit та Particle Photon не забезпечують достатньої стабільності та точності для керування польотом у складних сценаріях [12; 13; 17; 22; 23].

Стабільна та ефективна подача енергії є необхідною для безперебійної роботи всіх бортових систем дрона. Правильне керування живленням дозволяє уникати збоїв, підтримувати продуктивність платформи та гарантувати стабільність польоту.

Під час роботи дрона коливання напруги часто виникають при розгоні двигунів або різких маневрах, що може спричинити провали живлення та електричні шуми, здатні дестабілізувати чутливі компоненти. Обрана плата повинна витримувати такі умови або легко інтегруватися із зовнішніми стабілізаторами напруги та регуляторами живлення. Недостатнє керування живленням може призводити до скидання налаштувань, втрати зв'язку або критичних збоїв системи, тому важливо обирати плату з урахуванням енергетичних потреб дрона та характеристик акумуляторної батареї [10].

Arduino Uno приймає вхідну напругу 7–12 В через VIN та має вбудовану лінійну стабілізацію напруги. Вона стабільна для датчиків освітлення та логіки керування, проте не оптимізована для високоефективного використання батареї та може перегріватися при коливаннях навантаження або в енергоємних конфігураціях [12].

ESP8266 працює на внутрішній напрузі 3,3 В та дуже чутливий до стабільності живлення. Більшість модулів (наприклад, NodeMCU) мають вбудовані LDO, проте вони не справляються з раптовими стрибками напруги від двигунів. Тому ретельний розподіл та розв'язка живлення є необхідними, щоб запобігти падінню напруги під час польоту [13].

Під час оцінки стійкості до живлення та ефективності енергоспоживання ESP32 покращує стійкість до живлення, підтримуючи широкі діапазони вхідної напруги завдяки вбудованим регуляторам. Він має режими низького енергоспоживання та виявлення падіння напруги, що забезпечує кращу стабільність у польоті. Тим не менш, як і ESP8266, він виграє від зовнішньої стабілізації напруги. Це робить його хорошим вибором для дронів, які живляться від акумулятора, у поєднанні з надійною платою розподілу живлення (UBEC або PDB) [14].

Teensy 4.1 має високе енергоспоживання через потужний 600-МГц процесор, проте ефективно обробляє енергію завдяки внутрішньому імпульсному регулятору. Він потребує регульованого входу 5 В (не чистого LiPo) та має обмежену толерантність до нестабільного живлення. Для надійності польоту рекомендується живлення від спеціального 5-вольтового ВЕС [15].

STM32 «Blue Pill» працює при 3,3 В, проте не має надійного вбудованого регулятора. Він очікує стабільного зовнішнього живлення, наприклад, чистого понижувального перетворювача 5 В до 3,3 В. Високий шум або пульсації можуть спричинити збої системи, тому розподіл живлення має бути ретельно спроектований при використанні в дронах [16].

Raspberry Pi 4 має високе енергоспоживання (рекомендовано 5 В при 3 А) та дуже чутливий до падіння напруги. Він не може жити безпосередньо від акумулятора дрона без ефективного високострумового ВЕС. Раптове споживання енергії від двигунів може призвести до дроселювання або перезавантаження, якщо немає буферизації [17].

Стосовно впливу живлення на роботу керуючих платформ у дронах BBC micro:bit має дуже низьке енергоспоживання (3 В–3,3 В), але його просте керування живленням не призначене для роботи з шумними або спільними шинами живлення, такими як ESC або модулі камер. Найкраще використовувати в навчальних міні-дронах, які живляться через USB або компактні регулятори напруги [21].

Particle Photon працює при 3,3 В та підтримує вхід USB або VIN. Він ефективний для Інтернету речей, але у дронах вимагає чистого та регульованого джерела живлення. Нестабільність напруги може призвести до перезавантаження, особливо при використанні хмарних функцій або високочастотного зв'язку [22].

BeagleBone Black має регульований вхід 5 В з вбудованою мікросхемою керування живленням (PMIC), але його споживання енергії в режимі очікування та активного режиму є відносно високим. Як і Raspberry Pi, він потребує добре буферизованого та регульованого джерела 5 В; краще переносить коливання навантаження, ніж Pi, але все одно вимагає ретельного планування [23].

Оцінюючи енергоживлення як критичний фактор при виборі платформи Arduino Uno та Teensy 4.1 оснащені базовими стабілізаторами напруги, але не розраховані на енергоємні конфігурації.

ESP8266 та ESP32 чутливі до коливань напруги та вимагають ретельного проектування системи живлення для забезпечення стабільної роботи.

STM32, Raspberry Pi 4, Particle Photon та BeagleBone Black потребують високоякісного та стабільного джерела живлення для коректного функціонування.

BBC micro:bit не призначений для роботи у системах із спільними енергетичними шинами дрона.

Надійне зовнішнє джерело живлення (BEC, UBEC, PDB) є необхідним для більшості платформ, особливо при високих навантаженнях під час польоту.

Найбільш збалансованими та функціональними для створення систем керування польотом виявилися ESP32, Teensy 4.1 та STM32 «Blue Pill». Ці платформи поєднують: високу обчислювальну потужність, розвинену підтримку периферії (ШІМ, UART, I2C, SPI), можливість роботи з датчиками та камерами, сумісність із RTOS, що є критично важливим для задач реального часу. ESP32 має додаткову перевагу у вигляді вбудованого Wi-Fi та Bluetooth, а Teensy 4.1 вирізняється найвищою тактовою частотою та точністю таймерів. STM32, попри низьку вартість, забезпечує стабільність та розширюваність, хоча вимагає певного досвіду для налаштування [12-17; 21-23].

Менш оптимальними варіантами виявилися:

1. Arduino Uno та ESP8266, які підходять лише для навчальних чи прототипних проєктів через обмежені ресурси та відсутність повноцінної підтримки задач реального часу;

2. Raspberry Pi 4 та BeagleBone Black мають високу обчислювальну потужність та розвинене програмне середовище, проте їхня складність у керуванні живленням та відсутність гарантій реального часу роблять їх кращими для допоміжних обчислювальних задач (наприклад, візуальної обробки або телеметрії) замість основного контролера польоту;

3. BBC micro:bit та Particle Photon через апаратні обмеження, спрощене енергоживлення та обмежені інтерфейси непридатні для складних дронів [12-17; 21-23].

**Висновки.** Проаналізовані платформи показали, що ESP32, Teensy 4.1 та STM32 «Blue Pill» є найбільш доцільним вибором для керування БПЛА завдяки високій продуктивності, підтримці периферії та можливостям обробки в реальному часі. Arduino Uno та ESP8266 мають обмежену придатність для складних польотних завдань. Raspberry Pi 4 та BeagleBone Black, незважаючи на обчислювальну потужність, мають обмеження через відсутність RTOS та складність управління живленням.

**Перспективи подальших досліджень.** Подальші дослідження можуть бути зосереджені на оптимізації енергоспоживання, розробці адаптивних алгоритмів керування польотом та інтеграції більш складних сенсорних систем для підвищення автономності дронів. Також перспективним

напрямом є використання штучного інтелекту для оптимізації маршруту та стабілізації польотних характеристик.

**Список використаних джерел.**

1. Гуцул Т., Жежера І., Ткач В. **Особливості класифікації та методів вибору БПЛА** // Технічні науки та технології. 2022. № 4(30). С. 201–212. DOI: 10.25140/2411-5363-2022-4(30)-201-212. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/tnt\\_2022\\_4\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/tnt_2022_4_24) (дата звернення: 10.06.2025).
2. Маміч В., Семчак О., Буз А., Чкалов А., Король Д. **Дослідження бортового обладнання сучасних безпілотних літальних апаратів** // UNDERWATER TECHNOLOGIES: Industrial and Civil Engineering. 2023. Вип. 13. С. 74–80. URL: <http://uwtech.knuba.edu.ua/article/view/298896> (дата звернення: 10.06.2025).
3. Самойленко О.В., Богославець С.О., Стещенко П.М., Наусенко Б.Ю. **Особливості керування спільними бойовими порядками безпілотних і пілотованих літальних апаратів** // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. 2021. Вип. 17(24). С. 45–49. DOI: 10.54858/dndia.2021-17-7. URL: <https://znp.dndia.org.ua/index.php/znp/article/download/9/7> (дата звернення: 10.06.2025).
4. Микійчук М.М., Зіганшин Н.С. **Аналіз методів керування безпілотними літальними апаратами** // Вимірювальна техніка та метрологія. 2019. Т. 80, вип. 4. С. 37–40. DOI: 10.23939/istcm2019.04.00. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jan/20507/005.pdf> (дата звернення: 10.06.2025).
5. Espressif Systems. **ESP-Drone: Open-source Quadcopter Firmware for ESP32** [Електронний ресурс]. Espressif Systems, 2025. URL: <https://github.com/espressif/esp-drone> (дата звернення: 10.06.2025).
6. FreeRTOS Community Forum. **Using FreeRTOS with Teensy 4.1** [Електронний ресурс] // FreeRTOS Community Forum, 2025. URL: <https://forums.freertos.org/t/using-freertos-with-teensy-4-1/22518> (дата звернення: 10.06.2025).
7. Руднева С.В. **Створення багатофункціонального дрона для потреб ЗСУ на основі недефіцитних комплектувальних** // Електронний науковий учнівський журнал «Юний дослідник». 2024. № 1(2). [Електронний ресурс]. URL: <https://ojs.iod.gov.ua/index.php/ejd/article/view/24> (дата звернення: 10.06.2025).
8. **Як зібрати власного FPV дрона та налаштувати його для польоту** [Електронний ресурс]. URL: <https://rozumni-ideyi.com/posts/view/yak-zibraty-vlasnoho-fpv-drona-ta-nalashuvaty-yoho-dlya-polotu> (дата звернення: 10.06.2025).
9. Мішук Д.О., Рашківський В.П. **Програмування робототехнічних інформаційних систем: конспект лекцій**. Київ: КНУБА, 2024. 220 с. [Електронний ресурс]. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/14581> (дата звернення: 10.06.2025).
10. Сушко Д.В. **Керування, вплив та захист БПЛА** [Електронний ресурс]. URL: <https://spadok.org.ua/books/8622-30826-1-PB.pdf> (дата звернення: 10.06.2025).
11. UA Dynamics. **Теорія і практика застосування безпілотних літальних апаратів (дронів)**. 2022. [Електронний ресурс]. URL: <https://repository.gnpu.edu.ua/items/8bceb63c-ba8c-4345-ade9-d1a0f4f0c6c0> (дата звернення: 10.06.2025).
12. **Arduino Official Documentation** [Електронний ресурс]. URL: <https://www.arduino.cc/en/Guide/HomePage> (дата звернення: 09.06.2025).
13. Espressif Systems. **ESP8266 Technical Reference Manual**. 2018. [Електронний ресурс]. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical\\_reference\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical_reference_en.pdf) (дата звернення: 09.06.2025).
14. Espressif Systems. **ESP32 Official Documentation** [Електронний ресурс]. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/> (дата звернення: 09.06.2025).
15. PJRC. **Teensy 4.1 – Official Product Page** [Електронний ресурс]. URL: <https://www.pjrc.com/store/teensy41.html> (дата звернення: 09.06.2025).

16. STMicroelectronics. **STM32CubeIDE User Guide** [Електронний ресурс]. URL: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html> (дата звернення: 09.06.2025).
17. Raspberry Pi Foundation. **Raspberry Pi Documentation** [Електронний ресурс]. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/> (дата звернення: 09.06.2025).
18. **Порівняння Spark/Particle з альтернативами** // Particle Community. [Електронний ресурс]. URL: <https://community.particle.io/t/comparison-of-spark-particle-to-alternatives/11594> (дата звернення: 10.06.2025).
19. **Альтернативні платформи мікроконтролерів** // Maker Pro. [Електронний ресурс]. URL: <https://maker.pro/custom/tutorial/alternative-microcontroller-platforms> (дата звернення: 10.06.2025).
20. **Різниця між BBC micro:bit та BeagleBone Black** // Electronics For You. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.electronicshobby.com/technology-trends/learn-electronics/microbit-board-beaglebone-black> (дата звернення: 10.06.2025).
21. **Документація MicroPython для BBC micro:bit** [Електронний ресурс]. URL: <https://microbit-micropython.readthedocs.io/en/v2-docs/> (дата звернення: 09.06.2025).
22. Particle.io. **Particle Photon Official Documentation** [Електронний ресурс]. URL: <https://docs.particle.io/reference/datasheets/wi-fi/photon-datasheet/> (дата звернення: 09.06.2025).
23. BeagleBoard.org. **BeagleBone Black Documentation** [Електронний ресурс]. URL: <https://beagleboard.org/black> (дата звернення: 09.06.2025).
24. **Пром.ua – Платформи та електронні компоненти для дронів** [Електронний ресурс]. URL: <https://prom.ua/> (дата звернення: 11.06.2025).
25. **AliExpress – Комплектуючі для безпілотних апаратів** [Електронний ресурс]. URL: <https://www.aliexpress.com/> (дата звернення: 11.06.2025).
26. **TME – Магазин електронних компонентів** [Електронний ресурс]. URL: <https://www.tme.eu/> (дата звернення: 11.06.2025).