

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бортова комп'ютерна система для малих безпілотних літальних апаратів на основі енергоефективної архітектури
Назва теми

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»
Назва

Шифр КвРКІ 240116.04.01.19 ПЗ

Виконав здобувач II курсу, група КІ2М-24-1

Керівник канд.-екон. наук, доцент
Науковий ступінь, учене звання


Нормоконтролер д. техн. наук, професор
Науковий ступінь, учене звання

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КПС
«01» травня 2026 р.

дата


Підпис

Олександр БАСЮК
Ініціали, прізвище


Підпис

Світлана САЧЕНКО
Ініціали, прізвище


Підпис

Сергій ЛИСЕНКО
Ініціали, прізвище


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

Хмельницький 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
Рівень вищої освіти ДРУГИЙ (МАГІСТЕРСЬКИЙ)
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ
Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедри КПС
Ольга ПАВЛОВА



“ 12 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Басюку Олександр Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Бортова комп'ютерна система для малих безпілотних літальних апаратів на основі енергоефективної архітектури

Керівник проекту (роботи) Саченко Світлана Іванівна, к.е.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 12.01.2026 р. № 6

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.05.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

Комп'ютерна система для малих БПЛА на базі енергоефективної архітектури

Проектування системи комп'ютерного зору в бортовій комп'ютерній системі малого БПЛА на базі енергоефективної архітектури

Програмно-апаратна реалізація комп'ютерної системи для малих БПЛА на базі енергоефективної архітектури

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 12 » 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником		виконано
	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження		виконано
	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі		виконано
	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі		виконано
	Робота над науковою статтею		виконано
	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі		виконано
	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина		виконано
	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог		виконано
	Попередній захист ДРМ		
	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2026	виконано

Здобувач

Підпис

Олександр БАСЮК
Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

Підпис

Світлана САЧЕНКО
Імя, ПРІЗВИЩЕ

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: Бортова комп'ютерна система для малих безпілотних літальних апаратів на основі енергоефективної архітектури

Автор роботи: Басюк Олександр Олександрович.

Керівник роботи: Саченко Світлана Іванівна.

Пояснювальна записка: 80 с., 32 рис., 6 табл., 2 дод., 91 джерела.

МАЛИЙ БПЛА, БОРТОВА КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА АРХІТЕКТУРА, EMBEDDED-СИСТЕМА, RTOS, СЕНСОРНІ ДАНІ, СТАБІЛІЗАЦІЯ ПОЛЬОТУ, КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР, YOLO11N, ДЕТЕКЦІЯ ОБ'ЄКТІВ.

Об'єктом дослідження є бортові комп'ютерні системи малих безпілотних літальних апаратів.

Предметом дослідження є методи та засоби побудови енергоефективної архітектури бортової комп'ютерної системи, алгоритми обробки сенсорних даних, стабілізації польоту та реалізації комп'ютерного зору в embedded-системах БПЛА

Метою кваліфікаційної роботи магістра є розроблення енергоефективної бортової комп'ютерної системи для малих безпілотних літальних апаратів із підтримкою алгоритмів реального часу та модуля комп'ютерного зору на базі архітектури YOLO для автоматичного виявлення об'єктів.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи комп'ютерного зору, порівняльного аналізу, математичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

– набув подальшого розвитку підхід до побудови енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА на основі інтеграції модулів керування польотом, сенсорної обробки та комп'ютерного зору, який, на відміну від існуючих рішень, поєднує алгоритми детекції об'єктів на базі YOLO із механізмами енергоменеджменту та обробки даних у режимі реального часу;

– удосконалено архітектуру програмно-апаратної взаємодії компонентів бортової системи шляхом розподілу функцій між сенсорною підсистемою,

обчислювальними модулями та підсистемою енергозбереження, що дозволило підвищити ефективність використання обчислювальних ресурсів і зменшити енергоспоживання.

На основі проведених досліджень розроблена архітектура і компоненти програмного забезпечення для енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА з інтегрованим модулем комп'ютерного зору, яка може бути використана як основа для створення автономних безпілотних платформ, систем моніторингу, відеоаналітики, навігації та ситуаційної обізнаності в задачах цивільного й спеціального призначення.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленні енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА з інтегрованим модулем комп'ютерного зору, яка може бути використана як основа для створення автономних безпілотних платформ, систем моніторингу, відеоаналітики, навігації та ситуаційної обізнаності в задачах цивільного й спеціального призначення. Запропоновані програмно-апаратні рішення можуть бути адаптовані для використання на сучасних вбудованих платформах із обмеженим енергоспоживанням та підтримкою обробки даних у реальному часі.

У першому розділі проведено аналіз особливостей малих БПЛА, сучасних бортових комп'ютерних систем, вбудованих платформ та методів забезпечення енергоефективності. Розглянуто сучасні мікропроцесорні архітектури ARM, RISC-V та SoC.

У другому розділі розроблено структурну архітектуру бортової комп'ютерної системи, обґрунтовано вибір апаратної платформи, сенсорної підсистеми та засобів енергоменеджменту. Розглянуто питання резервування та забезпечення відмовостійкості системи.

У третьому розділі реалізовано програмну архітектуру системи, алгоритми збору та фільтрації сенсорних даних, стабілізації польоту та оптимізації енергоспоживання на програмному рівні. Для організації задач реального часу використано RTOS-підхід.

У четвертому розділі реалізовано та досліджено модуль комп'ютерного зору на базі архітектури YOLO11n. Проведено навчання моделі, аналіз метрик якості та експериментальну апробацію системи в задачах виявлення людей і транспортних засобів на аерофотозображеннях.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	5
Вступ.....	6
1 Аналіз предметної області та постановка задачі	9
1.1 Особливості малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА)	9
1.2 Архітектура сучасних бортових комп'ютерних систем	12
1.3 Аналіз існуючих апаратних платформ для БПЛА.....	14
1.4 Підходи до забезпечення енергоефективності в embedded-системах	19
1.5 Вимоги до бортової комп'ютерної системи малого БПЛА	20
1.6 Постановка мети та задач дослідження.....	24
1.7 Висновок до першого розділу	25
2 Метод та архітектура бортової комп'ютерної системи	27
2.1 Загальна структурна схема системи та метод функціонування.....	27
2.2 Обґрунтування вибору апаратної платформи.....	31
2.3 Проектування функціональної архітектури.....	39
2.4 Підсистема живлення та енергоменеджменту.....	40
2.5 Забезпечення відмовостійкості та резервування даних.....	42
2.6 Висновки до другого розділу	44
3 Програмна реалізація та алгоритмічне забезпечення	45
3.1 Вибір операційної системи реального часу (RTOS) або bare-metal підходу ..	45
3.2 Архітектура програмного забезпечення бортової комп'ютерної системи малого БПЛА.....	48
3.3 Алгоритми збору та фільтрації сенсорних даних.....	52
3.4 Алгоритми стабілізації та керування польотом	58
3.5 Оптимізація енергоспоживання на програмному рівні	61
3.5 Висновки до третього розділу	63
4 Експерименти та результати.....	65
4.1 Експериментальна апробація реалізації модуля комп'ютерного зору на базі архітектури YOLO	65

4.2 Висновки до четвертого розділу	82
Висновки.....	84
Перелік джерел посилань.....	86
Додаток А	96
Додаток Б.....	99

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БПЛА – Безпілотний літальний апарат

ARM – Advanced RISC Machine

RISC-V – Відкрита процесорна архітектура Reduced Instruction Set Computer

SoC (System on Chip) – система на кристалі

RTOS (Real-Time Operating System) – операційна система реального часу

IMU (Inertial Measurement Unit) – інерціальний вимірювальний модуль

GPS (Global Positioning System) – глобальна система позиціонування

ESC (Electronic Speed Controller) – електронний регулятор швидкості двигуна

ВСТУП

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів зумовлює зростання вимог до продуктивності, автономності та інтелектуалізації їх бортових систем. Малі БПЛА активно використовуються у сферах моніторингу, картографування, відеоспостереження, рятувальних операцій, логістики та систем ситуаційної обізнаності. Одночасно із розширенням функціональних можливостей таких систем виникає необхідність забезпечення високої обчислювальної продуктивності при обмежених енергетичних ресурсах та масогабаритних характеристиках апаратури.

Особливої актуальності набуває проблема розроблення енергоефективних бортових комп'ютерних систем, здатних забезпечувати обробку сенсорних даних, стабілізацію польоту та виконання алгоритмів комп'ютерного зору в режимі реального часу. Використання сучасних методів штучного інтелекту та нейромережових моделей значно підвищує функціональні можливості БПЛА, проте одночасно створює додаткове навантаження на embedded-платформи та збільшує енергоспоживання системи.

Актуальність роботи полягає в необхідності створення енергоефективних бортових комп'ютерних систем для малих безпілотних літальних апаратів, здатних забезпечувати автономне керування, обробку сенсорних даних та роботу алгоритмів комп'ютерного зору в режимі реального часу за умов обмежених обчислювальних і енергетичних ресурсів.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є розроблення енергоефективної бортової комп'ютерної системи для малих безпілотних літальних апаратів із підтримкою алгоритмів реального часу та модуля комп'ютерного зору на базі архітектури YOLO для автоматичного виявлення об'єктів.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- проаналізувати особливості малих БПЛА, сучасні бортові комп'ютерні системи та вимоги до їх енергоефективності;

- обґрунтувати вибір апаратної платформи та розробити структуру енергоефективної бортової комп'ютерної системи;
- розробити програмну архітектуру системи, алгоритми збору й фільтрації сенсорних даних та стабілізації польоту;
- реалізувати модуль комп'ютерного зору на основі архітектури YOLO для виявлення людей і транспортних засобів;
- провести експериментальну апробацію запропонованих рішень та оцінити ефективність системи за показниками точності, продуктивності й енергоспоживання.

Об'єктом дослідження є бортові комп'ютерні системи малих безпілотних літальних апаратів.

Предметом дослідження є методи та засоби побудови енергоефективної архітектури бортової комп'ютерної системи, алгоритми обробки сенсорних даних, стабілізації польоту та реалізації комп'ютерного зору в вбудованих системах БПЛА.

Наукова новизна отриманих результатів:

- набув подальшого розвитку підхід до побудови енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА на основі інтеграції модулів керування польотом, сенсорної обробки та комп'ютерного зору, який, на відміну від існуючих рішень, поєднує алгоритми детекції об'єктів на базі YOLO із механізмами енергоменеджменту та обробки даних у режимі реального часу;
- удосконалено архітектуру програмно-апаратної взаємодії компонентів бортової системи шляхом розподілу функцій між сенсорною підсистемою, обчислювальними модулями та підсистемою енергозбереження, що дозволило підвищити ефективність використання обчислювальних ресурсів і зменшити енергоспоживання.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленні енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА з інтегрованим модулем комп'ютерного зору, яка може бути використана як основа для створення

автономних безпілотних платформ, систем моніторингу, відеоаналітики, навігації та ситуаційної обізнаності в задачах цивільного й спеціального призначення.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи забезпечення функціонування систем з IoT, методи математичного моделювання.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію [89] у Збірнику наукових праць за матеріалами XIX Всеукраїнської науково практичної WEB конференції аспірантів, студентів та молодих вчених (25-27 березня 2026 р.). – Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2026. ст.286-288.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Особливості малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА)

Малі безпілотні літальні апарати (БПЛА) є класом аеродинамічних систем, що функціонують без пілота на борту та керуються дистанційно або автономно за допомогою вбудованих обчислювальних засобів. Відповідно до міжнародної класифікації, до малих БПЛА належать апарати з максимальною злітною масою до 25 кг, які використовуються для цивільних, комерційних, наукових і військових задач [1].

З точки зору комп'ютерної інженерії, ключовою особливістю малих БПЛА є жорсткі обмеження на масогабаритні показники, енергоспоживання та обчислювальні ресурси. Це обумовлює необхідність використання енергоефективних мікропроцесорних архітектур, оптимізованих алгоритмів керування та мінімізації апаратних компонентів.

За аеродинамічною схемою малі БПЛА поділяються на:

- 1) мультикоптери (квадрокоптери, гексакоптери) (рисунок 1.1).
- 2) літальні апарати літакового типу (рисунок 1.2).
- 3) гібридні VTOL-системи (Vertical Take-Off and Landing) (рисунок 1.3.)



a)



б)

Рисунок 1.1 – Приклад зображення мультикоптера [1]: (а) квадрокоптер, б) гексакоптер підвищеної вантажопідйомності)

Мультикоптери характеризуються високою маневреністю та простотою керування, однак мають обмежений час автономної роботи через постійне енергоспоживання двигунами. Літакові системи відзначаються більшою дальністю польоту та енергоефективністю, проте потребують складніших алгоритмів стабілізації. Гібридні системи поєднують переваги обох підходів, але мають складнішу бортову архітектуру.



Рисунок 1.2 – Малі безпілотні літальні апарати літакового типу [1]

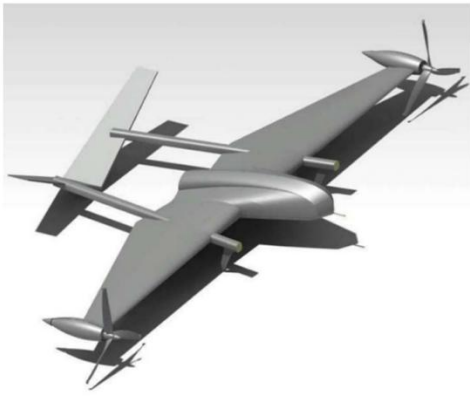


Рисунок 1.3 – Гібридний малий БПЛА типу VTOL [3]

Гібридні безпілотні літальні апарати типу VTOL поєднують можливість вертикального зльоту та посадки з ефективним горизонтальним крейсерським польотом. На початковому етапі польоту апарат функціонує як мультикоптер, використовуючи підйомну силу гвинтів для відриву від поверхні без необхідності злітної смуги. Після набору висоти система переходить у режим літакового польоту, де основну підйомну силу забезпечує крило, що значно підвищує енергоефективність і дозволяє виконувати тривалі місії [3].

У ході даного дослідження було проведено аналіз технічних характеристик цих типів БПЛА за такими параметрами як енергоефективність, час польоту, обчислювальне навантаження тощо. Результати аналізу наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація малих БПЛА

Параметр	Мультикоптер	Літаковий тип	VTOL
Енергоефективність	Низька–середня	Висока	Середня–висока
Час польоту	15–40 хв	1–4 год	1–3 год
Складність БКС	Середня	Висока	Висока

Кінець таблиці 1.1

Вимоги до RTOS	Обов'язкові	Обов'язкові	Критично важливі
Обчислювальне навантаження	Стабілізація, навігація	Навігація, автопілот	Перехідні режими + стабілізація

Малі безпілотні літальні апарати характеризуються жорсткими обмеженнями щодо маси, енергоспоживання та обчислювальних ресурсів, а також високими вимогами до реального часу та надійності. Ці особливості визначають необхідність розроблення енергоефективної бортової комп'ютерної системи з оптимізованою архітектурою, здатної забезпечити стабільну роботу в умовах обмежених ресурсів.

1.2 Архітектура сучасних бортових комп'ютерних систем

Бортова комп'ютерна система (БКС) малого безпілотного літального апарата є центральним обчислювальним вузлом, який забезпечує збір та обробку сенсорних даних, реалізацію алгоритмів стабілізації, навігації, планування маршруту, управління виконавчими механізмами та взаємодію з наземною станцією керування. Архітектура сучасних БКС формується з урахуванням обмежених енергетичних ресурсів, вимог реального часу, масогабаритних обмежень та необхідності високої надійності [4]. Типова архітектура бортової комп'ютерної системи малого БПЛА включає такі основні підсистеми: обчислювальне ядро, сенсорну підсистему, модуль керування виконавчими механізмами, комунікаційний модуль, підсистему живлення та енергоменеджменту, підсистему зберігання даних.

Обчислювальне ядро є центральним елементом БКС і реалізується на базі мікроконтролера, мікропроцесора або однокристальної системи (SoC). Воно відповідає за виконання алгоритмів керування, фільтрацію даних, оцінку стану апарата та формування керуючих сигналів для регуляторів швидкості двигунів.

Сенсорна підсистема забезпечує вимірювання параметрів руху та положення: лінійного прискорення, кутової швидкості, магнітного поля, атмосферного тиску, координат та швидкості. Дані надходять до обчислювального ядра через високошвидкісні інтерфейси (SPI, I2C, UART), де обробляються в режимі реального часу [4].

Модуль керування виконавчими механізмами формує PWM-сигнали або цифрові команди для електронних регуляторів швидкості (ESC), сервоприводів або інших виконавчих пристроїв. У сучасних БПЛА застосовуються два основні підходи до організації обчислювальної структури.

1) Однорівнева архітектура передбачає використання одного високопродуктивного мікроконтролера або процесора, який виконує як функції стабілізації польоту, так і додаткові задачі (обробку зображень, передачу телеметрії тощо). Такий підхід зменшує складність апаратної частини, але підвищує навантаження на центральний процесор.

2) Дворівнева (ієрархічна) архітектура передбачає розділення функцій між двома обчислювальними вузлами: контролер реального часу, високорівневий обчислювальний модуль.

Контролер реального часу забезпечує стабілізацію та критично важливі функції керування, тоді як супутній комп'ютер виконує ресурсоємні задачі: комп'ютерний зір, навігацію з використанням SLAM, передачу відеопотоку, алгоритми штучного інтелекту. Така архітектура підвищує надійність системи та дозволяє оптимізувати енергоспоживання. Сучасні БКС реалізуються на базі таких архітектур:

- 1) ARM Cortex-M (для задач реального часу та низького енергоспоживання);
- 2) ARM Cortex-A (для високопродуктивних задач);
- 3) RISC-V (перспективна відкрита архітектура);
- 4) гетерогенні SoC із вбудованими GPU або NPU.

Вибір архітектури визначається балансом між продуктивністю, енергоспоживанням та вартістю. Для малих БПЛА критично важливим є показник

продуктивність/Вт, що характеризує ефективність використання енергетичних ресурсів. Програмна структура БКС зазвичай реалізується за модульним принципом. Основні програмні компоненти включають: драйвери сенсорів, модулі фільтрації та оцінки стану (наприклад, комплементарні або Калманівські фільтри), регулятори стабілізації (PID або адаптивні алгоритми), модуль управління місією, комунікаційний стек [6].

Для забезпечення детермінованості виконання задач використовуються операційні системи реального часу (RTOS) або bare-metal підхід із пріоритетною обробкою переривань. Архітектура програмного забезпечення повинна забезпечувати мінімальну латентність, прогнозованість виконання та захист від збоїв.

Архітектура сучасних бортових комп'ютерних систем малих БПЛА формується як багаторівнева модульна структура, що поєднує енергоефективні мікропроцесорні рішення, підсистеми реального часу та механізми забезпечення надійності. Вибір архітектури визначається необхідністю досягнення оптимального співвідношення між продуктивністю, споживаною потужністю та безпекою функціонування апарата [7].

1.3 Аналіз існуючих апаратних платформ для БПЛА

Сучасні бортові комп'ютерні системи малих БПЛА реалізуються на базі спеціалізованих апаратних платформ, які поєднують мікроконтролер, периферійні інтерфейси, сенсорні модулі та комунікаційні засоби. Вибір апаратної платформи визначається вимогами до продуктивності, енергоефективності, масогабаритних характеристик, надійності та вартості.

Найпоширенішими платформами для реалізації функцій стабілізації та базової навігації є контролери польоту на базі мікроконтролерів сімейства ARM Cortex-M. До типових представників належать платформи серії STM32F4, STM32F7, STM32H7, що використовуються у таких відкритих екосистемах, як PX4 або ArduPilot. Основними перевагами таких платформ є низьке енергоспоживання,

детермінована робота в режимі реального часу, наявність апаратних таймерів PWM, підтримка численних периферійних інтерфейсів (SPI, I2C, UART, CAN), інтегровані модулі DMA та FPU.

Контролери польоту забезпечують частоту циклу стабілізації 200–1000 Гц, що є достатнім для мультикоптерних систем. Однак обмежені ресурси оперативної пам'яті та продуктивності не дозволяють виконувати складні алгоритми комп'ютерного зору або штучного інтелекту [6].

Для виконання ресурсоємних задач застосовуються високопродуктивні одноплатні комп'ютери. До них належать платформи на базі ARM Cortex-A, гетерогенні системи з GPU або NPU, вбудовані обчислювальні модулі з підтримкою Linux.

Такі системи використовуються для обробки відеопотоку, реалізації алгоритмів SLAM, розпізнавання об'єктів, автономної навігації. Недоліком є підвищене енергоспоживання (від 5 до 20 Вт), що істотно впливає на час автономної роботи малого БПЛА [7].

Сучасні тенденції передбачають використання гетерогенних обчислювальних платформ, які поєднують мікроконтролер реального часу, високопродуктивний процесор прикладного рівня, апаратні прискорювачі. Такий підхід дозволяє розподілити задачі між різними рівнями обчислювальної складності та оптимізувати енергоспоживання.

При проектуванні бортової комп'ютерної системи малого БПЛА необхідно враховувати продуктивність (DMIPS, CoreMark, FLOPS), обсяг RAM та Flash, підтримку RTOS, споживану потужність у різних режимах, теплові характеристики, наявність засобів захисту пам'яті, стійкість до вібрацій та електромагнітних завад.

Для малих БПЛА особливо важливим є співвідношення продуктивність/Вт, що визначає ефективність використання акумуляторної батареї [9].

Мікропроцесорна архітектура визначає функціональні можливості бортової комп'ютерної системи, її енергоспоживання, масштабованість та підтримку

програмного забезпечення. У сучасних БПЛА найчастіше застосовуються архітектури ARM, RISC-V та системи на кристалі (SoC).

ARM є домінуючою архітектурою у сфері вбудованих систем завдяки високій енергоефективності та широкій екосистемі розробки. Для БПЛА використовуються ARM Cortex-M використовується для задач реального часу та ARM Cortex-A для обчислювально складних задач [30].

Переваги ARM - це низьке енергоспоживання, розвинена підтримка RTOS, наявність DSP-інструкцій, апаратна підтримка FPU, широка підтримка виробниками.

Недоліком є ліцензійна модель, що обмежує можливість повної кастомізації ядра.

RISC-V є відкритою інструкційною архітектурою, що дозволяє розробникам створювати кастомізовані процесори з оптимізацією під конкретні задачі. Для БПЛА це відкриває можливість інтеграції спеціалізованих інструкцій для обробки сигналів, мінімізації споживання енергії, створення захищених обчислювальних середовищ.

Переваги RISC-V: відсутність ліцензійних обмежень, гнучкість конфігурації, масштабованість від простих контролерів до багатоядерних систем.

Недоліком є менш розвинена екосистема порівняно з ARM та обмежена кількість сертифікованих промислових рішень.

SoC інтегрують у межах одного кристалу процесорне ядро, контролери пам'яті, графічний процесор, периферійні інтерфейси, апаратні прискорювачі.

Перевагами SoC є зменшення масогабаритних показників, скорочення енергоспоживання завдяки інтеграції, підвищення швидкодії через зменшення затримок між компонентами.

Гетерогенні SoC із CPU + GPU або CPU + NPU є перспективними для реалізації алгоритмів машинного навчання в автономних БПЛА. Використання таких обчислювальних платформ дозволяє перенести обробку складних завдань комп'ютерного зору безпосередньо на борт літального апарату, мінімізуючи затримки при розпізнаванні дорожніх об'єктів чи перешкод у реальному часі. Це

забезпечує високу автономність функціонування системи навіть за умов відсутності стабільного зв'язку з наземною станцією керування або зовнішніми хмарними серверами.

У ході даного дослідження було проведено порівняльний аналіз мікропроцесорних архітектур для бортових комп'ютерних систем БПЛА, результати якого наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз мікропроцесорних архітектур для бортових комп'ютерних систем БПЛА

Параметр	ARM (Cortex-M / Cortex-A)	RISC-V	SoC (гетерогенні системи)
Тип архітектури	Закрита ліцензована RISC	Відкрита RISC	Інтегрована багатокomпонентна
Енергоефективність	Висока (особливо Cortex-M)	Висока (залежить від реалізації)	Середня–висока
Продуктивність	Від десятків до тисяч DMIPS	Масштабована	Висока (CPU + GPU/NPU)
Частота ядра	48–1500 МГц	50–1500+ МГц	500–2500+ МГц
Споживана потужність	50 мВт – 5 Вт	50 мВт – 5 Вт	5–25 Вт
Підтримка RTOS	Повна, розвинена	Активно розвивається	Linux, RTOS, гібридні системи

Кінець таблиці 1.2

Наявність FPU/DSP	Так (у більшості моделей)	Опційно	Так
Можливість кастомізації	Обмежена ліцензією	Повна	Частково (залежить від виробника)
Екосистема розробки	Дуже розвинена	Розвивається	Розвинена
Типове застосування в БПЛА	Контролер польоту	Енергоефективні кастомні системи	Обробка відео, ШІ, автономна навігація
Вартість інтеграції	Середня	Потенційно нижча	Вища

Аналіз існуючих апаратних платформ та мікропроцесорних архітектур (Таблиця 1.2) показує, що для малих БПЛА доцільним є використання ієрархічної структури з контролером реального часу на базі ARM Cortex-M або RISC-V та окремим високопродуктивним обчислювальним модулем у разі необхідності складної обробки даних. Ключовим критерієм вибору є забезпечення максимального співвідношення продуктивність/Вт за збереження детермінованості виконання задач реального часу.

ARM Cortex-M є оптимальним вибором для контролера реального часу малого БПЛА завдяки низькому енергоспоживанню та високій передбачуваності виконання. ARM Cortex-A та гетерогенні SoC доцільні для систем із комп'ютерним зором та автономною навігацією. RISC-V є перспективною альтернативою для створення енергоефективних кастомізованих рішень, однак потребує подальшого розвитку програмної екосистеми.

1.4 Підходи до забезпечення енергоефективності в embedded-системах

У ході даного дослідження було проведено аналіз джерел з літератури українських та закордонних науковців на тему підходів до забезпечення ефективності в embedded-системах.

Українські науковці Савченко та Нікітенко у роботі [14] згадують про оптимальне керування маршрутами (детермінований локальний пошук, «заборонений пошук»). Богомолів та Чуманов у [15] стверджують, що енергоефективність вбудованої системи залежить від вибору MCU/MPU, структури шин, периферії, режимів роботи, а не лише від одного параметра «споживання процесора». Романюк та співавтори у [8] стверджують, що архітектура програмного стека, подієва модель, частоти опитування датчиків, пріоритезація задач, мінімізація зайвих обчислень і телеметрії прямо впливають на енергобюджет.

Поряд з тим, Sembiring et al у [3] пропонують підхід, де керування траєкторією tilt-rotor UAV реалізується методами deep learning. DL-керування створює нове навантаження на бортовий обчислювач: якщо модель виконується на CPU без акселерації, це може підвищувати споживання та вимоги до реального часу. Автори [19] розглядають енергоефективність у такій постановці як не тільки мінімізацію споживання процесора, а пошук оптимуму між якістю автономності (точністю/стійкістю алгоритмів), часом виконання та витратами енергії. Подібну ідею розвиває Любимов у [23], акцентуючи оптимізацію режимів роботи mission computer з урахуванням одночасно енергоефективності та реактивності системи. Liu у своїй роботі [20] демонструють підхід CPU/FPGA/NPU, де енергоефективність досягається шляхом перенесення конкретних фрагментів обчислень. Питання системної інтеграції гетерогенності в авіоніці піднімають автори [25] у контексті flight management system архітектурний вигравш виникає лише тоді, коли розподіл задач між обчислювальними доменами відповідає їх часовій критичності та вимогам до детермінізму. Osmani & Schulz у [27] розглядають авіоніку комплексно: енергоефективність тут залежить не лише

від “CPU”, а від архітектури живлення, шин, сенсорів, комунікацій та взаємодії модулів, тобто від правильного проектування всієї бортової екосистеми. Suo та співавтори у [21] пропонують концепцію edge-орієнтованої енергоефективної системи розпізнавання об’єктів, де економія досягається через оптимізацію пайплайна розпізнавання, зменшення надлишкових обчислень та адаптацію під обмеження борту. Ortega та співавтори у [24] доповнюють цей напрям практичною площиною low-cost embedded CV показово, що енергоефективність часто досягається не “чарівним чипом”, а грамотним поєднанням бюджетної платформи, оптимізованих моделей та режимів роботи сенсорів. Gupta у [22] узагальнюють підходи green UAV-based fog computing, ключовою ідеєю є те, що частину обчислень або сервісів можна винести на периферію, а БПЛА перетворюється на елемент розподіленої системи, де енергетичний баланс залежить від схеми обміну даними та мережових політик. Virgili та співавтори [22] розглядають енергонеутральність у контексті UAV-based mobile network. Saini & Jain у [29] підсилюють мережовий аспект на рівні протоколів ad hoc для UAV. Chodnicki та співавтори у [26] показують, що енергоефективні методи керування (з урахуванням перешкод і поривів вітру) можуть зменшувати витрати енергії через оптимальні маневри і стабілізацію. Для БКС це означає потребу в підтримці алгоритмів, які враховують енергію як критерій, але при цьому не порушують вимоги реального часу. Це формує підґрунтя для подальшого обґрунтування вибору енергоефективної архітектури бортової комп’ютерної системи у цій роботі: критичні задачі реального часу мають виконуватися на детермінованому енергоефективному обчислювачі, тоді як ресурсоємні обчислення - масштабуватися гетерогенно та/або адаптивно, з урахуванням фаз місії та енергетичного стану.

1.5 Вимоги до бортової комп’ютерної системи малого БПЛА

Бортова комп’ютерна система (БКС) малого безпілотного літального апарата є центральним елементом управління, обробки даних та взаємодії із зовнішнім

середовищем. Враховуючи обмеження маси, енергетичного ресурсу, теплових режимів та вимоги реального часу, до БКС висувається комплекс взаємопов'язаних технічних, функціональних та експлуатаційних вимог. Перелік вимог з показниками (метриками) для їх вимірювання наведені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Формалізовані вимоги до бортової комп'ютерної системи малого БПЛА

№	Вимога	Показник (метрика)	Обґрунтування	Метод перевірки
1	Детермінованість виконання задач	Частота циклу стабілізації ≥ 400 Гц; затримка < 5 мс	Забезпечення стійкості польоту та швидкої реакції на зміни параметрів	Вимірювання періоду циклу таймером; профілювання latency
2	Енергоефективність	Споживана потужність $\leq 3-5$ Вт (для БКС малого класу); показник продуктивність/Вт	Збільшення тривалості місії без збільшення маси АКБ	Вимірювання струму та напруги у різних режимах роботи
3	Достатня обчислювальна потужність	≥ 200 DMIPS (контролер RT); підтримка FPU	Забезпечення виконання фільтрів та регуляторів у реальному часі	Бенчмарки (CoreMark, Dhrystone), тестування алгоритмів

Продовження таблиці 1.3

4	Підтримка RTOS	Наявність пріоритетного планування задач	Критичні задачі мають гарантований доступ до CPU	Тестування пріоритетів, моделювання перевантаження
5	Підтримка периферії	Наявність SPI, I2C, UART, PWM, CAN	Підключення сенсорів, ESC та модулів зв'язку	Перевірка роботи інтерфейсів під навантаженням
6	Надійність	Наявність watchdog; механізмів fault handling	Запобігання втраті керування при збої	Імітація збоїв, тестування аварійного перезапуску
7	Масогабаритні характеристики	Маса ≤ 100 г; компактність PCB	Мінімальний вплив на льотні характеристики	Зважування та вимірювання габаритів
8	Теплові характеристики	Температура процесора $< 80^{\circ}\text{C}$	Запобігання тротлінгу та деградації компонентів	Тепловий моніторинг під навантаженням
9	Стійкість до завад	Робота в діапазоні $10\dots+60^{\circ}\text{C}$; ЕМІ-стійкість	Польотна експлуатація у різних умовах	Кліматичні та вібраційні тести

1.6 Постановка мети та задач дослідження

Аналіз сучасних архітектур бортових комп'ютерних систем, мікропроцесорних платформ та підходів до забезпечення енергоефективності embedded-систем показав, що для малих безпілотних літальних апаратів критичним є забезпечення оптимального співвідношення між продуктивністю, енергоспоживанням та детермінованістю виконання задач реального часу. Існуючі рішення або орієнтовані на максимальну обчислювальну потужність із підвищеним енергоспоживанням, або забезпечують мінімальне споживання за рахунок обмежених функціональних можливостей. У зв'язку з цим актуальним є розроблення бортової комп'ютерної системи малого БПЛА, архітектура якої орієнтована на енергоефективність без втрати стабільності керування та функціональності.

Метою магістерської роботи є розроблення та дослідження бортової комп'ютерної системи для малого безпілотного літального апарата на основі енергоефективної архітектури, яка забезпечує детерміноване виконання задач реального часу при мінімізації енергоспоживання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- 1) Провести аналіз сучасних архітектур бортових комп'ютерних систем малих БПЛА та мікропроцесорних платформ.
- 2) Дослідити підходи до забезпечення енергоефективності в embedded-системах.
- 3) Сформулювати технічні вимоги до бортової комп'ютерної системи малого БПЛА.
- 4) Обґрунтувати вибір мікропроцесорної архітектури та структурної організації системи.
- 5) Розробити структурну та функціональну модель бортової комп'ютерної системи.

6) Реалізувати програмну архітектуру з підтримкою режимів енергозбереження.

7) Провести експериментальні дослідження енергоспоживання та продуктивності системи.

8) Оцінити ефективність запропонованої архітектури за критерієм “продуктивність/Вт”.

Очікуваним результатом роботи має стати енергоефективна бортова комп’ютерна система малого БПЛА з обґрунтованою архітектурою, підтвердженою експериментальними дослідженнями та порівняльним аналізом з існуючими рішеннями.

1.7 Висновок до першого розділу

У першому розділі здійснено комплексний аналіз особливостей малих безпілотних літальних апаратів, сучасних архітектур бортових комп’ютерних систем та підходів до забезпечення енергоефективності в embedded-системах.

Встановлено, що малі БПЛА характеризуються жорсткими обмеженнями щодо масогабаритних параметрів, енергетичного ресурсу та теплових режимів, що безпосередньо впливає на вимоги до бортової комп’ютерної системи. Особливо критичними є забезпечення детермінованості виконання задач реального часу, стабільності керування польотом та мінімізації енергоспоживання.

Аналіз існуючих апаратних платформ показав, що для систем керування польотом доцільним є використання енергоефективних мікроконтролерів класу ARM Cortex-M або аналогічних рішень RISC-V, тоді як ресурсоємні задачі (комп’ютерний зір, автономна навігація) можуть виконуватися на окремих обчислювальних модулях або гетерогенних SoC. Визначено, що перспективним напрямом є ієрархічна архітектура з розподілом функцій між контуром реального часу та високорівневим обчислювальним рівнем.

Проведений огляд наукових джерел засвідчив, що енергоефективність бортових систем формується не лише на апаратному рівні, але й через

алгоритмічні, програмні та мережеві рішення. До основних підходів належать використання гетерогенних архітектур, апаратних прискорювачів, адаптивних режимів роботи, оптимізація алгоритмів обробки даних, а також енергетично орієнтоване керування польотом і маршрутом.

Сформульовано формалізовані вимоги до бортової комп'ютерної системи малого БПЛА, що охоплюють функціональні, енергетичні, обчислювальні, апаратні та експлуатаційні аспекти.

Проведений аналіз підтверджує актуальність розроблення бортової комп'ютерної системи малого БПЛА на основі енергоефективної архітектури, що забезпечує баланс між продуктивністю, енергоспоживанням та вимогами реального часу.

2 МЕТОД ТА АРХІТЕКТУРА БОРТОВОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Загальна структурна схема системи та метод функціонування

Малі БПЛА характеризуються обмеженим енергетичним ресурсом, що безпосередньо впливає на тривалість місії та функціональні можливості системи. Зростання обчислювальної складності алгоритмів автономної навігації та комп'ютерного зору потребує підвищення продуктивності бортових систем, що може призводити до збільшення енергоспоживання. Для розробки енергоефективної бортової комп'ютерної системи для малих БПЛА запропонуємо дворівневу гетерогенну архітектуру, яка складається з наступних рівнів:

Рівень 1 – Контур реального часу, який включає в себе низькопотужний мікроконтролер (ARM Cortex-M або RISC-V) виконує задачі стабілізації, обробки IMU-даних, керування двигунами.

Рівень 2 – Високопродуктивний модуль, який складається з SoC або одноплатного комп'ютера, який виконує задачі комп'ютерного зору, планування маршруту, аналізу місії.

Запропонована енергоефективна бортова комп'ютерна система реалізується як ієрархічна гетерогенна архітектура з адаптивним керуванням енергоспоживанням. Дворівнева гетерогенна архітектура бортової комп'ютерної системи малого БПЛА системи наведена на рисунку 2.1.

На рисунку 2.2. представлено структурну схему енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА

Ключовим аспектом адаптивного керування енергоспоживанням є спроможність динамічного переведення обчислювальних компонентів другого рівня у режими глибокого сну або зниженого енерговиділення під час виконання рутинних етапів польоту, коли відсутня потреба у ресурсомісткій обробці відеопотоку.

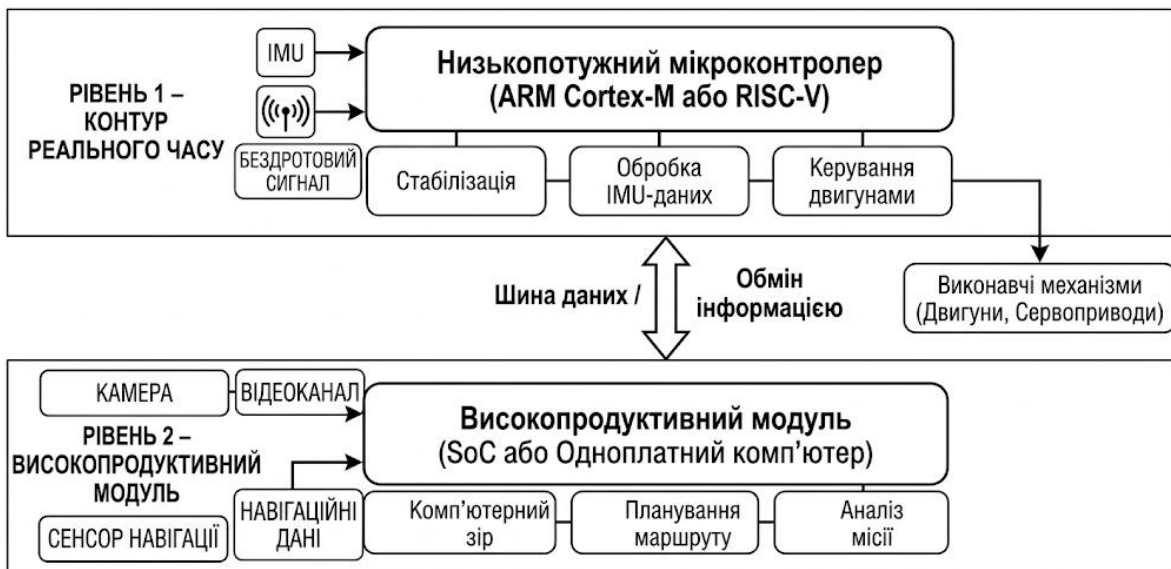


Рисунок 2.1 – Дворівнева гетерогенна архітектура бортової комп’ютерної системи малого БПЛА



Рисунок 2.2 – Структурна схема енергоефективної бортової комп’ютерної системи малого БПЛА

Система починається із сенсорної підсистеми, яка формує первинний інформаційний потік. До її складу входять інерціальний вимірювальний блок (IMU), GPS-модуль, барометр, відеокамера та інші телеметричні датчики. Ці

компоненти забезпечують отримання просторових, навігаційних та візуальних даних, необхідних для стабілізації та автономного функціонування БПЛА.

Дані із сенсорів надходять до модуля попередньої обробки, де здійснюється їх фільтрація, нормалізація та синхронізація. На цьому етапі зменшується вплив шумів, усуваються часові неузгодженості між сигналами різних датчиків та формується уніфікований потік даних для подальшої обробки.

Наступним ключовим елементом є контур керування реальним часом, реалізований на базі енергоефективного мікроконтролера (MCU). Він виконує обробку інерціальних даних, реалізує алгоритми стабілізації (PID або model-based control), формує керуючі сигнали для електронних регуляторів швидкості двигунів (ESC) та забезпечує пріоритетне планування задач у середовищі RTOS. Цей рівень відповідає за детермінованість та мінімальні затримки керування.

Паралельно функціонує високорівневий обчислювальний модуль (SoC), який виконує ресурсоємні задачі: комп'ютерний зір, планування маршруту, обробку місії та аналіз телеметрії. Він активується залежно від потреб місії та взаємодіє з контуром реального часу через визначені інтерфейси обміну даними.

Центральним елементом архітектури є модуль адаптивного керування енергоспоживанням. Він реалізує динамічне масштабування частоти та напруги живлення (DVFS), переводить неактивні модулі у режими зниженого енергоспоживання, здійснює динамічну активацію обчислювальних блоків та моніторинг миттєвої споживаної потужності. Завдяки цьому забезпечується баланс між продуктивністю та енергетичним бюджетом.

Енергетична підсистема представлена акумуляторною батареєю та модулем контролю живлення. Вона забезпечує контроль рівня заряду, оцінку залишкового ресурсу та формування сигналів про критичні режими роботи. Завершальним елементом є модуль передачі даних на наземну станцію. Він забезпечує передачу телеметрії, відеопотоку та журналювання параметрів польоту для подальшого аналізу та керування місією.

Для кількісної оцінки ефективності архітектури введемо показники продуктивності або потужності, який описується за формулою 2.1.

$$\eta = \frac{P_{comp}}{P_{power}}, \quad (2.1)$$

де P_{comp} - обчислювальна продуктивність (операції/с або FPS), P_{power} - споживана потужність (Вт).

Максимізація η забезпечує підвищення ефективності використання енергії. Енергія на виконання місії обчислюється за формулою 2.2.

$$E_{mission} = \int_0^T P(t) dt, \quad (2.2)$$

де P_t - миттєва споживана потужність, T - тривалість польоту.

Зменшення $E_{mission}$ дозволяє збільшити тривалість автономної роботи. Питома енергія на обробку кадру обчислюється за формулою 2.3.

$$E_{frame} = \frac{P_{avg}}{FPS}, \quad (2.3)$$

де P_{avg} - середня потужність системи, FPS - кількість оброблених кадрів за секунду.

Цей показник є критичним для систем комп'ютерного зору на борту БПЛА.

Отже, метод забезпечення енергоефективності бортових комп'ютерних систем для малих БПЛА складається з наступних кроків:

- 1) Функціональний розподіл задач між рівнями.
- 2) Використання DVFS (Dynamic Voltage and Frequency Scaling).
- 3) Адаптивна активація обчислювальних модулів залежно від фази місії.
- 4) Використання RTOS із пріоритетним плануванням.

Запропонований підхід дозволяє досягти балансу між продуктивністю, стабільністю реального часу та мінімізацією енергоспоживання. Архітектура є масштабованою та може адаптуватися до різних класів малих БПЛА.

2.2 Обґрунтування вибору апаратної платформи

Вибір апаратної платформи для бортової комп'ютерної системи малого безпілотного літального апарата є ключовим етапом проектування, оскільки саме від характеристик обчислювального ядра, периферійних інтерфейсів та енергоспоживання залежить ефективність функціонування всієї системи. Враховуючи сформульовані у розділі 1 вимоги, апаратна платформа повинна забезпечувати виконання задач реального часу, підтримувати роботу з сенсорними модулями та одночасно мати мінімальне енергоспоживання. Серед сучасних рішень для побудови бортових систем малих БПЛА можна виділити три основні класи платформ:

Мікроконтролери (MCU). До цієї групи належать платформи на базі ARM Cortex-M та RISC-V. Вони характеризуються низьким енергоспоживанням (1–3 Вт), високою детермінованістю виконання задач та обмеженими обчислювальними ресурсами. MCU є оптимальними для реалізації контуру керування польотом, однак недостатні для задач комп'ютерного зору. Приклад мікроконтролера представлено на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Мікроконтролер для реалізації контуру керування реального часу БПЛА [33]

Одноплатні комп'ютери (SBC). Наприклад, Raspberry Pi [34] або подібні системи на базі ARM Cortex-A. Їх особливості - це висока обчислювальна потужність, підтримка повноцінних операційних систем, значне енергоспоживання (5–10 Вт) та відсутність жорстких гарантій реального часу. Такі платформи доцільно використовувати як високорівневий обчислювальний модуль. Приклад одноплатного комп'ютера представлено на рисунку 2.4.

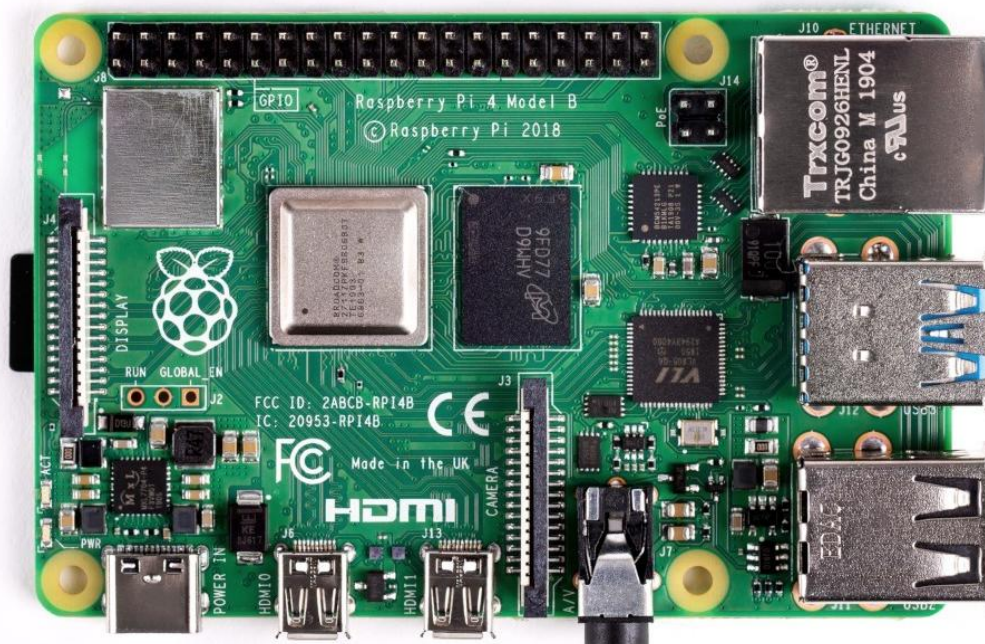


Рисунок 2.4 – Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 для високорівневих обчислень у БПЛА [34]

Гетерогенні системи (MCU + SoC) поєднують переваги попередніх підходів. MCU забезпечує стабільність і роботу в реальному часі, SoC виконує ресурсоємні задачі є можливість гнучкого розподілу навантаження та оптимальне співвідношення «продуктивність-енергія». Саме цей підхід є найбільш перспективним для сучасних БПЛА.

Сенсорна підсистема містить у собі IMU, GPS, барометр, камеру та джерело даних для навігації, тобто всі потрібні датчики. Приклад сенсорної підсистеми Matek Systems GNSS M10Q-5883 U-Blox M10 GPS - з компасом QMC5883L представлено на рисунку 2.5 [35].

Енергетична підсистема БПЛА складається з літєво-полімерного (LiPo) акумулятора (рисунок 2.6), BMS або PDB (рисунок 2.7) та живлення системи [36-37].

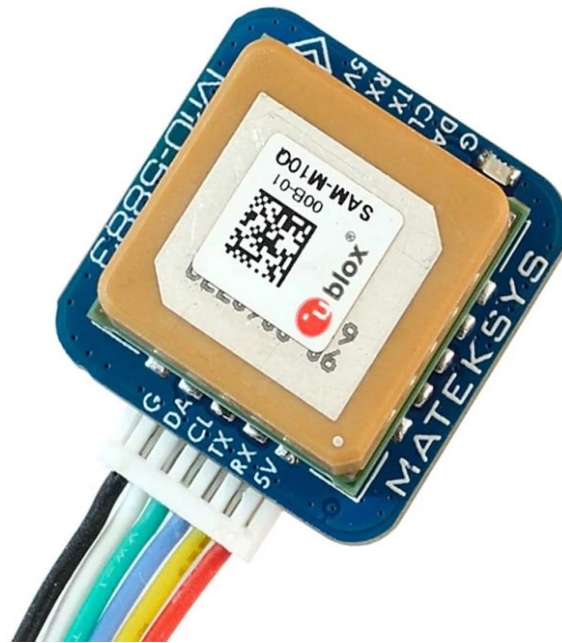


Рисунок 2.5 – Сенсорна підсистема Matek Systems GNSS M10Q-5883 U-Blox M10 GPS - з компасом QMC5883L для малого безпілотного літального апарата [35]



Рисунок 2.6 – Літєво-полімерний акумулятор[36]

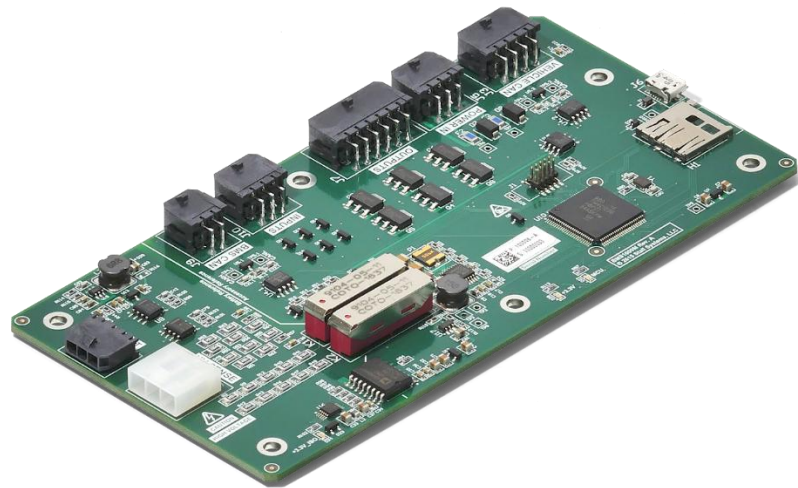


Рисунок 2.7 – Система керування живленням Staff Systems BMS1000 [37]

Система передачі даних (зв'язок), яка включає в себе телеметричні модулі (рисунок 2.8), FPV передавач (рисунок 2.9) та системи для радіозв'язку [38-39]. На рисунку 2.10 наведено інтеграцію апаратних компонентів у структурі малого БПЛА [40].



Рисунок 2.8 – Модуль телеметрії 3DR 433MHz 500mW(X6) [38]



Рисунок 2.9 – FPV передавач 48CH 4000W [39]

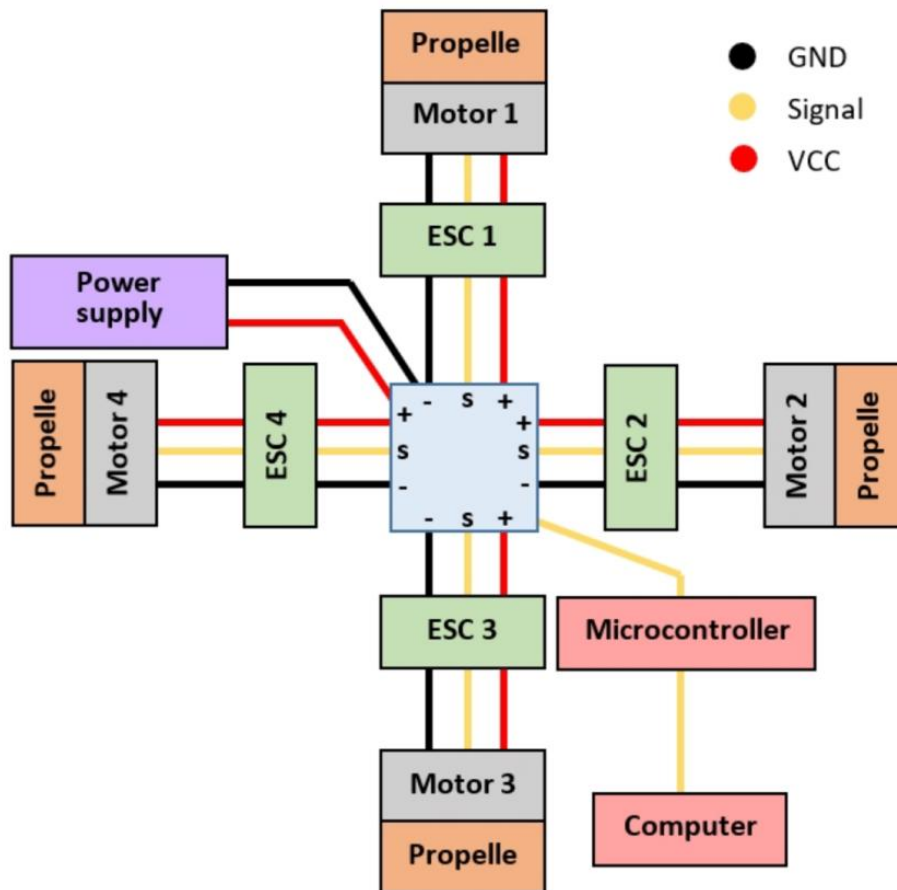


Рисунок 2.10 – Інтеграція апаратних компонентів у структурі малого БПЛА [40].

Оцінювання доцільності вибору апаратної платформи для бортової комп'ютерної системи малого безпілотного літального апарата здійснюється на

основі сукупності технічних критеріїв, серед яких ключовими є енергоспоживання, обчислювальна продуктивність, здатність забезпечувати роботу в режимі реального часу, наявність необхідних периферійних інтерфейсів, можливість масштабування системи та доступність програмних засобів розробки. Кожен із зазначених критеріїв безпосередньо впливає на ефективність функціонування БПЛА в умовах обмеженого енергетичного ресурсу та жорстких вимог до стабільності керування.

У таблиці 2.1 наведено порівняльний аналіз характеристик мікроконтролерної архітектури, архітектури на базі одноплатного комп'ютера та гетерогенної системи.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз апаратних платформ для БКС малого БПЛА

Критерій	Мікроконтроле р (MCU, ARM Cortex-M)	Одноплатни й комп'ютер (SBC)	Гетерогенна система (MCU + SoC)
Енергоспоживанн я	Низьке (0.5–3 Вт)	Високе (5–10 Вт)	Середнє (3–6 Вт, адаптивне)
Продуктивність	Низька– середня	Висока	Висока (розподілена)
Реальний час (RT)	Повна підтримка	Обмежена	через MCU

Кінець таблиці 2.1

Периферійні інтерфейси	Широка підтримка (SPI, I2C, UART, PWM)	менш детерміновано	Максимальна
Обробка відео	Немає	Підтримується	Ефективно (на SoC)
Масштабованість	Обмежена	Середня	Висока
Складність реалізації	Низька	Середня	Вища
Надійність	Висока	Середня	Висока
Програмна підтримка	RTOS/ bare-metal	Linux/ ROS	RTOS + Linux
Енергоефективність (продуктивність/Вт)	Середня	Низька	Висока

Порівняльний аналіз показує, що мікроконтролери забезпечують високу детермінованість і низьке енергоспоживання, однак обмежені у продуктивності. Одноплатні комп'ютери, навпаки, мають високу обчислювальну потужність, але характеризуються значним енергоспоживанням і відсутністю гарантій реального

часу. Найбільш збалансованим рішенням є гетерогенна архітектура, яка поєднує переваги обох підходів і забезпечує оптимальне співвідношення продуктивності, енергоефективності та вимог реального часу.

Проведений порівняльний аналіз сучасних апаратних платформ показує, що мікроконтролери забезпечують мінімальне енергоспоживання та високу детермінованість виконання задач, однак їх обчислювальні можливості є недостатніми для реалізації складних алгоритмів обробки даних. Одноплатні комп'ютери, навпаки, характеризуються високою продуктивністю та широкими можливостями програмної реалізації, але мають значно більше енергоспоживання і не гарантують жорстких часових обмежень. Таким чином, жоден із розглянутих класів платформ окремо не забезпечує одночасного виконання всіх вимог, що висуваються до бортової комп'ютерної системи малого БПЛА.

З урахуванням отриманих результатів обґрунтованим є вибір гетерогенної апаратної платформи, яка поєднує мікроконтролер класу ARM Cortex-M для виконання задач реального часу та одноплатний комп'ютер або систему на кристалі для реалізації ресурсоємних алгоритмів. Такий підхід дозволяє ефективно розподілити обчислювальне навантаження відповідно до характеру задач, мінімізуючи енергоспоживання та забезпечуючи стабільність роботи системи.

Перевага запропонованої архітектури полягає у тому, що критично важливі задачі керування виконуються на енергоефективному мікроконтролері, тоді як високопродуктивний модуль активується лише за необхідності. Це дозволяє досягти високого рівня енергоефективності без втрати функціональних можливостей. Крім того, ізоляція контуру реального часу забезпечує детермінованість роботи системи незалежно від навантаження високорівневого обчислювального модуля. Архітектура також характеризується високою масштабованістю, що дозволяє адаптувати систему до різних сценаріїв застосування БПЛА, а також розширювати її функціональність без суттєвих змін базової структури

2.3 Проектування функціональної архітектури

Запропонована архітектура базується на принципі розділення обчислювального навантаження між апаратними вузлами з різним рівнем продуктивності та енергоспоживання. Головна мета системи - забезпечити баланс між складними обчисленнями (наприклад, машинним зором) та жорсткими вимогами до енергоефективності й безпеки польоту в реальному часі. На рисунку 2.11 представлено схему архітектури енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА.

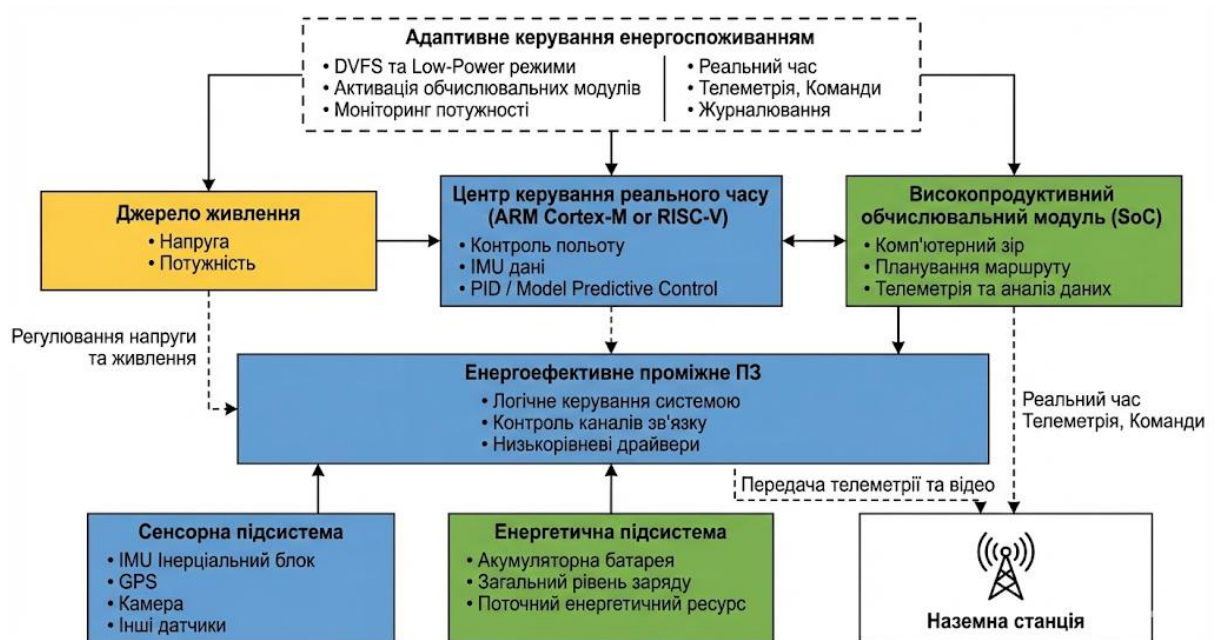


Рисунок 2.11 – Архітектура енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА

Структурно систему можна поділити на кілька ключових рівнів та модулів:

1) Обчислювальне ядро (гетерогенна система), основою обчислень є розділення задач на дві гілки. Центр керування реального часу (MCU), побудований на базі мікроконтролерів (наприклад, ARM Cortex-M або RISC-V). Цей модуль відповідає за критичні для польоту задачі з мінімальною затримкою: збір даних з IMU, стабілізацію безпілота, керування двигунами за

допомогою алгоритмів PID та Model Predictive Control (MPC). Високопродуктивний обчислювальний модуль (SoC) включає систему на кристалі, що бере на себе «важкі» некритичні задачі. До них належать комп'ютерний зір, побудова та планування маршруту, а також глибокий аналіз даних і телеметрії. За потреби цей модуль може переходити у сплячий режим для економії енергії.

2) Адаптивне керування енергоспоживанням - це керівний надбудовний блок, який динамічно оптимізує витрати енергії, використовує технологію DVFS (динамічне масштабування напруги та частоти) і Low-Power режими для оптимізації роботи процесорів керує активацією та деактивацією окремих обчислювальних модулів (наприклад, вимикає SoC, коли комп'ютерний зір не потрібен) та дійснює постійний моніторинг споживаної потужності, веде журналювання та передає дані телеметрії в реальному часі.

3) Енергоефективне проміжне ПЗ (Middleware) - програмний прошарок, що об'єднує апаратну частину з високорівневими алгоритмами, яке забезпечує логічне керування всією системою та безперебійний обмін даними між MCU, SoC та периферією та містить низькорівневі драйвери для роботи з датчиками та керує каналами зв'язку.

4) Периферійні підсистеми складаються з сенсорної підсистеми, яка збирає дані про довкілля та стан БПЛА. Включає інерціальний блок (IMU), GPS-модуль, камеру для комп'ютерного зору та інші додаткові датчики, енергетичної підсистеми та джерела живлення, які відповідають за фізичне забезпечення системи струмом. Система контролює загальний рівень заряду акумуляторної батареї, оцінює поточний енергетичний ресурс і регулює напругу для різних вузлів.

5) Зв'язок із наземною станцією, архітектура передбачає надійний канал зв'язку для передачі телеметрії, трансляції відеопотоку в реальному часі та отримання команд керування від оператора.

2.4 Підсистема живлення та енергоменеджменту

Підсистема живлення є критично важливим компонентом бортової комп'ютерної системи малого безпілотного літального апарата, оскільки саме вона визначає тривалість автономної роботи, стабільність функціонування електронних модулів та ефективність використання енергетичних ресурсів. У малих БПЛА джерелом живлення, як правило, виступає літій-полімерний акумулятор (LiPo), який одночасно забезпечує живлення силової установки та бортової електроніки. Це зумовлює необхідність раціонального розподілу енергії між підсистемами з урахуванням їх функціональної важливості.

Основним завданням підсистеми живлення є забезпечення стабільної напруги живлення для всіх компонентів бортової системи при змінних режимах навантаження. Враховуючи, що різні модулі працюють на різних рівнях напруги (наприклад, 3.3 В для мікроконтролера, 5 В для одноплатного комп'ютера, 12 В і більше для силової частини), у складі підсистеми використовуються понижувальні перетворювачі напруги (DC-DC converters), які забезпечують необхідні рівні живлення з високим коефіцієнтом корисної дії. Висока ефективність перетворення є важливою умовою мінімізації втрат енергії та зниження тепловиділення.

Окрім перетворення напруги, підсистема живлення виконує функції моніторингу та захисту. До її складу входять датчики струму та напруги, що дозволяють у режимі реального часу оцінювати споживану потужність, а також модулі захисту від перенапруги, короткого замикання та глибокого розряду акумулятора. Отримані дані використовуються для формування рішень щодо зміни режимів роботи системи або аварійного завершення місії.

Ключовим елементом підсистеми є модуль енергоменеджменту, який реалізує алгоритми оптимізації енергоспоживання бортової комп'ютерної системи. Його функціонування базується на адаптивному керуванні режимами роботи окремих компонентів залежно від поточного навантаження та енергетичного стану системи. Зокрема, застосовуються механізми динамічного масштабування частоти та напруги живлення процесорів, переведення неактивних модулів у режими сну, а також вибір оптимального рівня обчислювальної активності.

У гетерогенній архітектурі бортової системи енергоменеджмент відіграє особливо важливу роль, оскільки дозволяє ефективно координувати роботу низькопотужного мікроконтролера та високопродуктивного обчислювального модуля. Контур реального часу функціонує постійно з мінімальним енергоспоживанням, тоді як високорівневий модуль активується лише у випадках необхідності виконання ресурсоємних задач, таких як обробка відеопотоку або планування траєкторії. Це дозволяє значно зменшити середню споживану потужність системи.

Для оцінки ефективності підсистеми живлення та енергоменеджменту використовуються інтегральні показники, зокрема загальна енергія, спожита під час виконання місії, та показник «продуктивність/потужність». Зменшення середнього енергоспоживання без втрати функціональності безпосередньо впливає на збільшення тривалості польоту та підвищення ефективності використання акумуляторної батареї. Підсистема живлення та енергоменеджменту є невід'ємною частиною енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА. Її правильне проектування дозволяє забезпечити стабільність роботи, підвищити надійність системи та оптимізувати використання енергетичних ресурсів в умовах обмеженого енергетичного бюджету.

2.5 Забезпечення відмовостійкості та резервування даних

Забезпечення відмовостійкості бортової комп'ютерної системи малого безпілотного літального апарата є одним із ключових аспектів її проектування, оскільки від надійності функціонування залежить безпека польоту, збереження апарата та виконання місії. Умови експлуатації БПЛА характеризуються впливом зовнішніх факторів, таких як вібрації, перепади температур, електромагнітні завади, а також можливими програмними та апаратними збоями, що потребує впровадження комплексних механізмів забезпечення стійкості до відмов. Відмовостійкість бортової системи досягається шляхом поєднання апаратних та програмних методів. На апаратному рівні важливу роль відіграє використання

надійних компонентів, стабілізованих джерел живлення та захисту від перенапруги і коротких замикань. Оскільки перебої живлення є однією з основних причин відмов, підсистема живлення повинна забезпечувати стабільну роботу навіть при короткочасних просіданнях напруги. Для цього застосовуються фільтри, буферні ємності та контролери живлення.

Одним із базових механізмів підвищення надійності є використання апаратного та програмного watchdog-таймера. У разі зависання програмного забезпечення або порушення нормального циклу виконання задач відбувається автоматичне перезавантаження системи, що дозволяє відновити її працездатність без втручання оператора. Такий підхід є особливо важливим для автономних БПЛА, де відсутня можливість оперативного ручного втручання. У гетерогенній архітектурі додатковим рівнем відмовостійкості є розподіл функцій між обчислювальними модулями. Контур реального часу, реалізований на мікроконтролері, функціонує незалежно від високорівневого обчислювального модуля. У разі відмови або перевантаження SoC, система керування польотом продовжує працювати у базовому режимі, забезпечуючи стабілізацію та можливість аварійного завершення місії. Такий підхід дозволяє уникнути повної втрати керування апаратом. Резервування є ще одним ефективним методом підвищення відмовостійкості. У бортових системах малого БПЛА воно може реалізовуватися у декількох формах. Зокрема, резервування сенсорів передбачає використання декількох джерел даних для визначення положення та орієнтації апарата. Наприклад, поєднання IMU та GPS дозволяє компенсувати помилки або відмову одного з сенсорів. Резервування каналів зв'язку забезпечує можливість підтримання зв'язку з наземною станцією у разі втрати основного каналу. На програмному рівні важливими є механізми виявлення та обробки помилок. До них належать контроль цілісності даних, обробка виняткових ситуацій, перевірка коректності вхідних даних та реалізація алгоритмів деградації функціональності. У разі виникнення відмови система може переходити у спрощений режим роботи, зменшуючи функціональність, але зберігаючи керуваність апарата. Додатково доцільним є застосування журналювання подій, що дозволяє фіксувати параметри

роботи системи та причини можливих відмов. Це забезпечує можливість подальшого аналізу та вдосконалення архітектури бортової системи.

2.6 Висновки до другого розділу

У другому розділі розроблено концептуальні та практичні рішення щодо побудови енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого безпілотного літального апарата на основі гетерогенної архітектури. Проведено обґрунтування вибору апаратної платформи, визначено склад та взаємодію основних компонентів системи, а також розглянуто підходи до організації підсистеми живлення, енергоменеджменту та забезпечення відмовостійкості. У результаті аналізу апаратних платформ встановлено, що найбільш доцільним рішенням є використання гетерогенної архітектури, яка поєднує енергоефективний мікроконтролер для реалізації задач реального часу та високопродуктивний обчислювальний модуль для виконання ресурсоємних алгоритмів. Такий підхід дозволяє забезпечити баланс між продуктивністю, енергоспоживанням та детермінованістю виконання задач.

Розроблена структурна організація бортової системи передбачає функціональний розподіл задач між рівнями архітектури, що забезпечує ефективне використання обчислювальних ресурсів та зменшення середнього енергоспоживання. Особливу увагу приділено підсистемі живлення, яка забезпечує стабільність роботи всіх компонентів та реалізує механізми моніторингу і керування енергоспоживанням. Впровадження адаптивних методів енергоменеджменту, зокрема динамічного масштабування частоти та напруги живлення, дозволяє оптимізувати використання енергетичного ресурсу без втрати функціональності системи. У підрозділі, присвяченому забезпеченню відмовостійкості, визначено основні загрози стабільній роботі бортової системи та запропоновано комплекс заходів, спрямованих на підвищення надійності.

3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Вибір операційної системи реального часу (RTOS) або bare-metal підходу

Програмна архітектура бортової комп'ютерної системи малого безпілотного літального апарата повинна забезпечувати детерміноване виконання задач керування, ефективне використання апаратних ресурсів та стабільну роботу в умовах обмеженого енергетичного бюджету. Одним із ключових етапів проєктування програмного забезпечення є вибір підходу до організації виконання задач: використання операційної системи реального часу (RTOS) або реалізація системи за bare-metal підходом.

Bare-metal підхід передбачає безпосереднє виконання програмного коду на мікроконтролері без використання операційної системи. У цьому випадку програмне забезпечення взаємодіє з апаратними ресурсами напряму через регістри периферії та механізми обробки переривань. Основною перевагою такого підходу є мінімальні накладні витрати на виконання, низьке енергоспоживання та максимальна детермінованість роботи системи. Крім того, bare-metal дозволяє реалізувати дуже компактне програмне забезпечення, що є важливим для мікроконтролерів з обмеженим обсягом пам'яті.

Разом із тим, зі збільшенням кількості функціональних модулів та складності алгоритмів виникають суттєві обмеження. Організація багатозадачності, синхронізації та обміну даними між підсистемами значно ускладнюється, що негативно впливає на масштабованість та супровід програмного забезпечення. Для сучасних БПЛА, де одночасно виконуються задачі стабілізації, навігації, телеметрії, моніторингу енергоспоживання та взаємодії з високорівневим обчислювальним модулем, bare-metal підхід може ускладнювати подальший розвиток системи.

Альтернативою є використання операційної системи реального часу. RTOS забезпечує механізми багатозадачності, пріоритетного планування, міжпроцесної взаємодії та синхронізації задач. Це дозволяє логічно розділити функціональні

компоненти системи та підвищити надійність програмної архітектури. У системах керування БПЛА RTOS забезпечує гарантований час реакції на події та дозволяє реалізувати детерміноване виконання критичних задач.

Серед сучасних RTOS для embedded-систем найбільш поширеними є FreeRTOS, Zephyr RTOS, NuttX та ChibiOS. FreeRTOS характеризується невеликими накладними витратами, широкою підтримкою ARM Cortex-M та великою кількістю готових бібліотек. NuttX активно використовується у системах PX4 та ArduPilot, оскільки підтримує POSIX-сумісний інтерфейс та розвинені механізми драйверів. Zephyr RTOS орієнтована на модульність та підтримку сучасних embedded-платформ, однак має дещо більші вимоги до ресурсів.

Порівняльний аналіз RTOS та bare-metal підходів для бортової комп'ютерної системи БПЛА наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз RTOS та bare-metal підходів для бортової комп'ютерної системи БПЛА

Критерій	Bare-metal підхід	RTOS-підхід
Накладні витрати системи	Мінімальні	Наявні системні накладні витрати
Енергоспоживання	Низьке	Низьке–середнє
Детермінованість виконання	Висока	Висока
Підтримка багатозадачності	Обмежена	Повноцінна

Кінець таблиці 3.1

Пріоритетне планування задач	Реалізується вручну	Вбудована підтримка
Складність реалізації	Зростає зі складністю системи	Нижча для складних систем
Масштабованість	Обмежена	Висока
Підтримка синхронізації задач	Реалізується програмно	Вбудовані механізми
Робота з перериваннями	Безпосередній контроль	Контроль через RTOS API
Підтримка енергозбереження	Реалізується вручну	Tickless idle, sleep modes
Зручність супроводу коду	Нижча	Вища
Надійність великих систем	Обмежена	Вища
Придатність для складних БПЛА	Частково придатний	Найбільш доцільний
Типові сфери використання	Прості контролери, low-level firmware	Багатофункціональні embedded-системи

Для розроблюваної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА доцільним є використання RTOS-підходу, оскільки система має багаторівневу архітектуру та повинна одночасно виконувати декілька незалежних задач із різними пріоритетами. Використання операційної системи реального часу дозволяє реалізувати окремі задачі стабілізації польоту, опрацювання сенсорних даних,

передачі телеметрії та моніторингу енергоспоживання у вигляді незалежних потоків виконання. У межах даної роботи як базову операційну систему реального часу обрано FreeRTOS[91]. Такий вибір обумовлений її низькими накладними витратами, підтримкою механізмів пріоритетного планування, наявністю режимів енергозбереження та широкою підтримкою мікроконтролерів ARM Cortex-M. Додатковою перевагою є можливість реалізації tickless idle mode, що дозволяє зменшити енергоспоживання процесора у періоди низької активності.

Програмна архітектура системи передбачає використання окремих задач для критичних функціональних модулів. Найвищий пріоритет мають задачі стабілізації та обробки інерціальних даних, оскільки вони визначають безпечність польоту. Задачі телеметрії, журналювання та взаємодії з високорівневим обчислювальним модулем мають нижчий пріоритет і можуть виконуватися асинхронно.

Таким чином, використання RTOS у бортовій комп'ютерній системі малого БПЛА забезпечує оптимальне поєднання детермінованості, масштабованості та енергоефективності. Обраний підхід створює основу для реалізації модульної програмної архітектури та подальшої інтеграції алгоритмів адаптивного енергоменеджменту й автономного керування.

3.2 Архітектура програмного забезпечення бортової комп'ютерної системи малого БПЛА

Архітектура програмного забезпечення бортової комп'ютерної системи малого безпілотного літального апарата визначає структуру взаємодії між функціональними модулями, принципи обробки даних та механізми керування апаратними ресурсами. Враховуючи вимоги реального часу, енергоефективності та відмовостійкості, програмна архітектура повинна забезпечувати модульність, масштабованість і можливість паралельного виконання задач із різними рівнями пріоритету.

У розроблюваній системі використовується багаторівнева програмна архітектура, побудована на основі операційної системи реального часу FreeRTOS

[91]. Такий підхід дозволяє розділити функціональні компоненти на незалежні задачі, що виконуються паралельно та взаємодіють через механізми синхронізації й обміну повідомленнями. Кожна задача відповідає за окрему функціональну область системи, що спрощує супровід програмного забезпечення та підвищує його надійність. Схема архітектури програмного забезпечення бортової комп'ютерної системи малого БПЛА представлена на рисунку 3.1.

Нижній рівень архітектури формують драйвери апаратного забезпечення, які забезпечують взаємодію мікроконтролера з периферійними модулями. До цього рівня належать драйвери інтерфейсів SPI, I2C, UART, PWM та ADC, а також драйвери сенсорних модулів, зокрема IMU, GPS та барометра. Основним завданням драйверного рівня є забезпечення стабільного та детермінованого доступу до апаратних ресурсів із мінімальними затримками.

Над драйверним рівнем розташований рівень системних сервісів, який реалізує механізми планування задач, синхронізації потоків виконання, обробки таймерів та управління пам'яттю.

Вище за рівень системних сервісів розташовується рівень прикладних модулів та проміжного програмного забезпечення, який відповідає за безпосереднє виконання високорівневих функцій автономного польоту. До цього прошарку входять модулі комплексування даних від різнорідних сенсорів (зокрема алгоритми фільтрації), обчислення поточної просторової орієнтації, а також стеки протоколів бездротового зв'язку для обміну телеметричною інформацією з наземною станцією. Головною метою функціонування даного рівня є трансформація первинних апаратних сигналів у скоригований вектор стану БПЛА, необхідний для стабільної роботи контурів автоматичного регулювання.

Найвищий щабель ієрархії займає рівень управління місією та забезпечення функціональної безпеки, який координує загальну поведінку літального апарату шляхом реалізації скінченних автоматів режимів польоту.

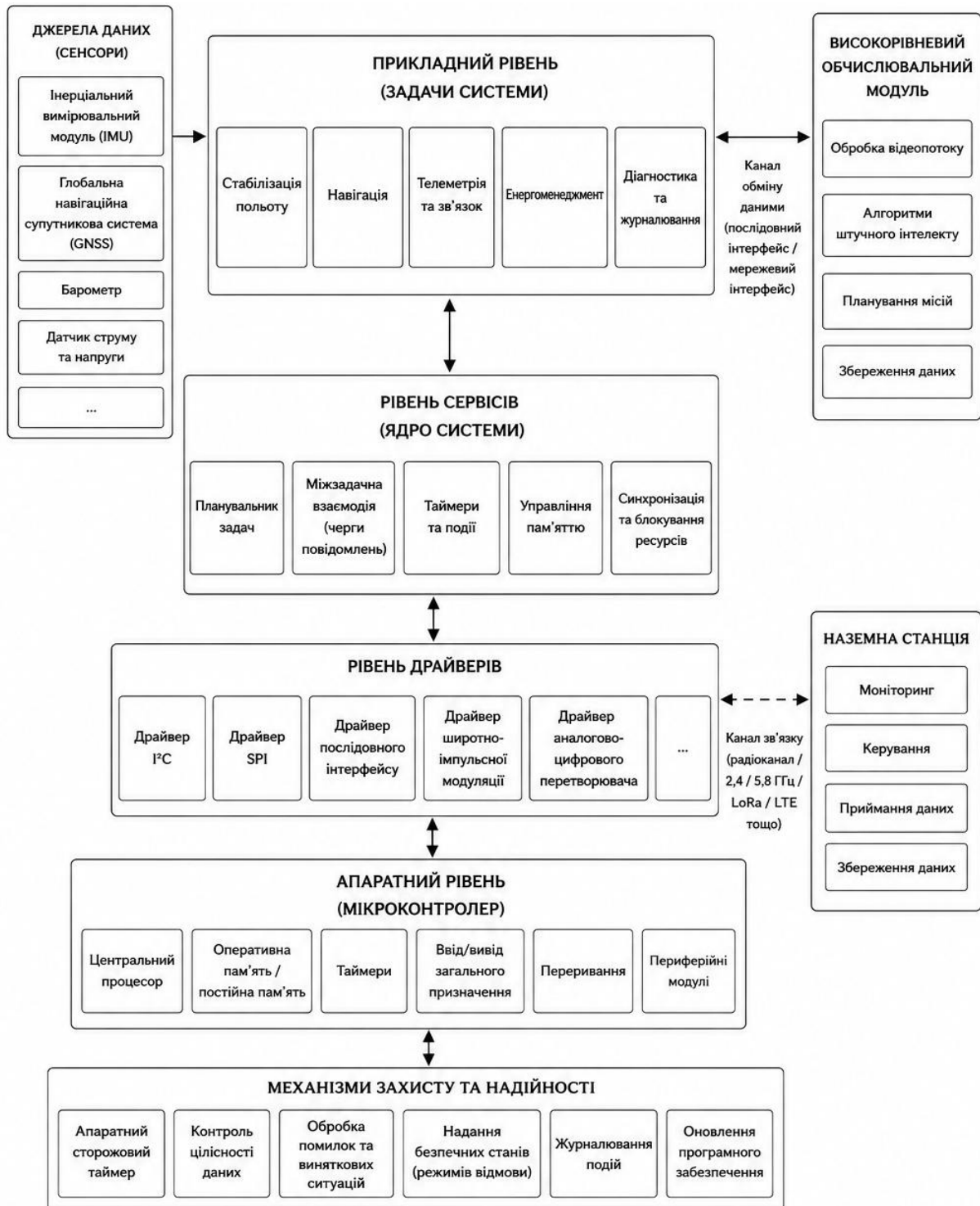


Рисунок 3.1 - Схема архітектури програмного забезпечення бортової комп'ютерної системи малого БПЛА

На цьому рівні функціонує ядро FreeRTOS, що забезпечує пріоритетне планування задач та підтримку механізмів міжпроцесної взаємодії. Для обміну

даними між задачами використовуються черги повідомлень, mutex-механізми та бінарні семафори.

Функціональний рівень програмної архітектури включає основні задачі бортової комп'ютерної системи. Центральною задачею є модуль стабілізації польоту, який виконує обробку інерціальних даних та формує керуючі сигнали для двигунів. Ця задача має найвищий пріоритет, оскільки визначає безпечність та стабільність польоту.

Окремо реалізується задача навігації, що обробляє дані GPS та барометра, визначає поточне положення апарата та виконує базові функції маршрутизації. Задача телеметрії забезпечує передачу параметрів польоту на наземну станцію та приймання команд керування. Для підвищення енергоефективності частота передачі телеметрії може адаптивно змінюватися залежно від режиму польоту.

Важливим компонентом архітектури є модуль енергоменеджменту, який здійснює моніторинг споживання енергії та керування режимами роботи системи. Він аналізує рівень заряду акумулятора, навантаження на процесор та активність периферійних модулів, після чого приймає рішення щодо переходу окремих компонентів у режими зниженого енергоспоживання. Для реалізації цього механізму використовуються можливості FreeRTOS, зокрема tickless idle mode та програмне керування частотою виконання задач.

У гетерогенній архітектурі високорівневий обчислювальний модуль функціонує як окрема підсистема, що взаємодіє з контуром реального часу через стандартизовані канали обміну даними. На цьому рівні можуть виконуватися алгоритми комп'ютерного зору, аналізу відеопотоку та автономного планування траєкторії. Взаємодія між мікроконтролером та SoC реалізується через UART, SPI або Ethernet-з'єднання залежно від вимог до пропускну здатності та затримок.

Для підвищення надійності програмної архітектури реалізуються механізми контролю помилок та відновлення після збоїв. До них належать watchdog-таймери, перевірка коректності даних сенсорів, журналювання критичних подій та аварійне перезавантаження окремих модулів у разі виникнення помилок.

3.3 Алгоритми збору та фільтрації сенсорних даних

Однією з ключових функцій бортової комп'ютерної системи малого безпілотного літального апарата є отримання, обробка та аналіз даних із сенсорної підсистеми. Якість та достовірність сенсорної інформації безпосередньо впливають на стабільність польоту, точність навігації та ефективність роботи алгоритмів керування. Оскільки дані від сенсорів можуть містити шуми, похибки вимірювання та короткочасні спотворення, необхідним є застосування алгоритмів фільтрації та попередньої обробки.

У розроблюваній системі основними джерелами даних є інерціальний вимірювальний модуль (IMU), GPS-приймач, барометр та датчики струму і напруги. IMU включає акселерометр та гіроскоп, які забезпечують оцінку лінійних прискорень і кутових швидкостей апарата. GPS використовується для визначення координат і швидкості руху, а барометр - для оцінки висоти польоту. Датчики струму та напруги застосовуються для моніторингу енергетичного стану системи.

Збір сенсорних даних реалізується у вигляді періодичних задач операційної системи реального часу FreeRTOS. Для кожного типу сенсорів визначається власна частота опитування залежно від динаміки процесів, які вони характеризують. Дані IMU зчитуються з високою частотою (100–1000 Гц), оскільки використовуються у контурі стабілізації польоту. GPS та барометричні дані оновлюються рідше, зазвичай із частотою 5–20 Гц, що є достатнім для навігаційних задач. Перед передачею даних до функціональних модулів системи виконується їх попередня обробка, яка включає перевірку коректності значень, усунення аномальних вимірювань та нормалізацію даних. Для зменшення впливу випадкових шумів застосовуються алгоритми цифрової фільтрації. Одним із базових методів є ковзне середнє, яке дозволяє згладжувати короткочасні коливання сигналу. Для послідовності вимірювань x_i значення фільтра визначається за формулою 3.1.

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x[n - i], \quad (3.1)$$

де N - розмір вікна усереднення; $x[n-i]$ - попередні значення сигналу.

Перевагою цього методу є простота реалізації та низькі обчислювальні витрати, що є важливим для embedded-систем із обмеженими ресурсами. Недоліком є виникнення затримки сигналу при збільшенні розміру вікна фільтрації. Для більш ефективного пригнічення шумів у даних ІМУ використовується комплементарний фільтр, який поєднує переваги акселерометра та гіроскопа. Гіроскоп забезпечує швидку реакцію на зміни орієнтації, але має накопичення похибки з часом, тоді як акселерометр характеризується більшою стабільністю при довготривалих вимірюваннях. Цей алгоритм математично об'єднує високочастотну складову від датчика кутової швидкості та низькочастотну складову від вимірювача прискорення, що дозволяє отримати згладжене значення кута без суттєвих фазових затримок. Завдяки введенню вагових коефіцієнтів забезпечується гнучке налаштування балансу між швидкістю відгуку системи на динамічні маневри та її стійкістю до високочастотних вібрацій бортових двигунів. Мінімальна обчислювальна складність комплементарної фільтрації робить її оптимальним вибором для виконання безпосередньо у контурі реального часу мікроконтролера першого рівня. Такий підхід дозволяє суттєво розвантажити центральний процесор бортового комплексу, зберігаючи стабільно високу частоту оновлення навігаційних даних. Оцінка кута орієнтації визначається виразом 3.2.

$$\theta = \alpha(\theta_{prev} + \omega\Delta t) + (1 - \alpha)\theta_{acc}, \quad (3.2)$$

θ_{prev} - попереднє значення кута;

ω - кутова швидкість гіроскопа;

Δt - часовий інтервал;

θ_{acc} - оцінка кута за акселерометром;

α - коефіцієнт фільтрації.

Алгоритми збору та фільтрації сенсорних даних наведені на рисунках 3.2-3.5. Зокрема, алгоритм збору сенсорних даних представлено на рисунку 3.2.

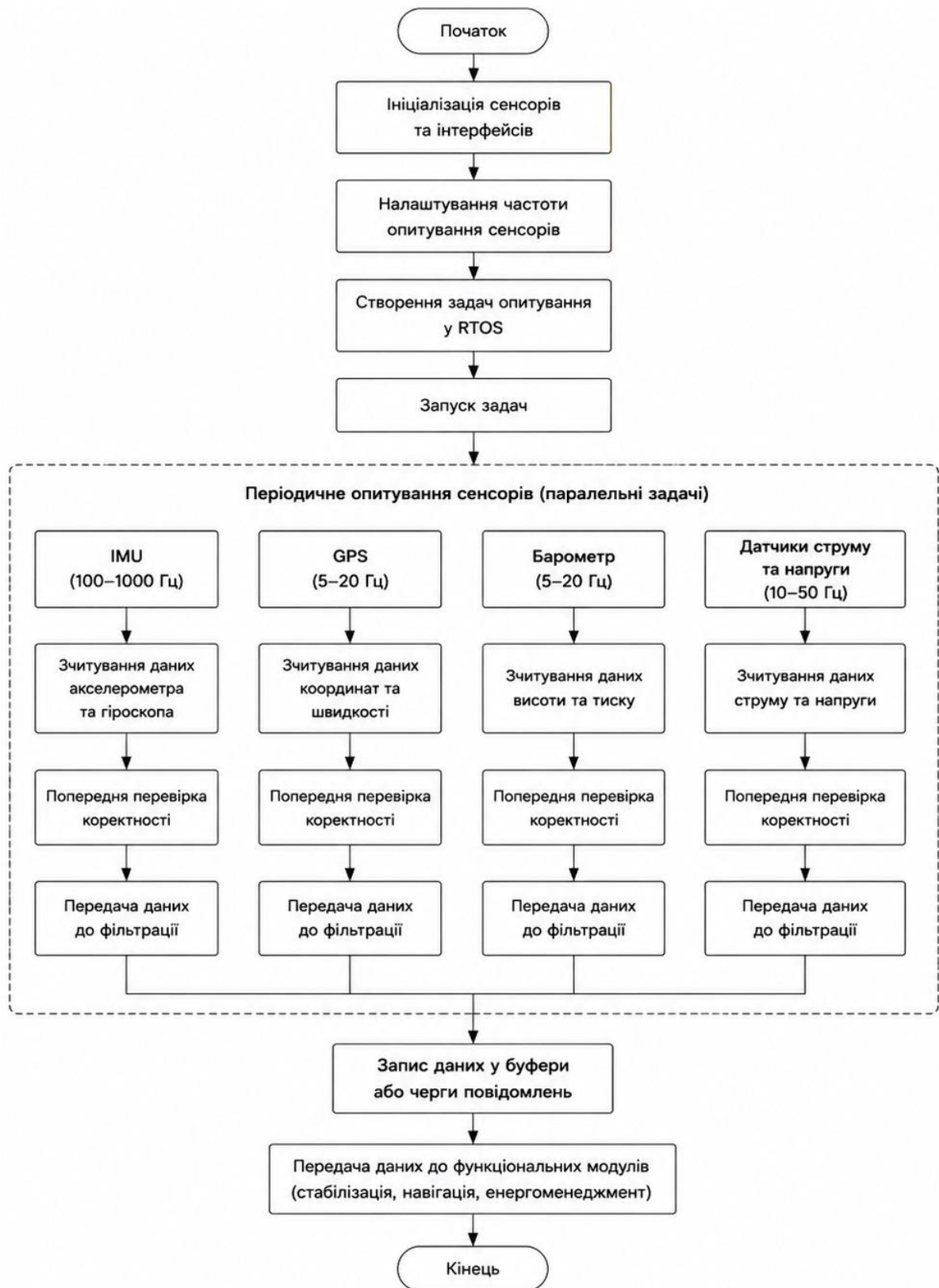


Рисунок 3.2 – Алгоритм збору сенсорних даних бортової комп’ютерної системи малого БПЛА

Використання комплементарного фільтру дозволяє отримати стабільну оцінку орієнтації при невеликих обчислювальних витратах, що є важливим для систем реального часу. Алгоритм комплементарного фільтру наведено на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 – Алгоритм комплементарного фільтру

Для задач навігації можливе застосування фільтра Калмана, який забезпечує об'єднання даних із декількох сенсорів та мінімізацію похибки оцінювання стану системи. Проте реалізація повного фільтра Калмана потребує більших обчислювальних ресурсів, тому у малих БПЛА доцільним є використання його спрощених модифікацій або комплементарного підходу. Після фільтрації сенсорні дані передаються до задач стабілізації та навігації через механізми міжзадачної

взаємодії FreeRTOS. Для цього використовуються черги повідомлень або буфери спільної пам'яті, що дозволяє забезпечити синхронізацію потоків виконання та уникнути конфліктів доступу до даних. Алгоритм фільтрації ковзним середнім наведено на рисунку 3.4.

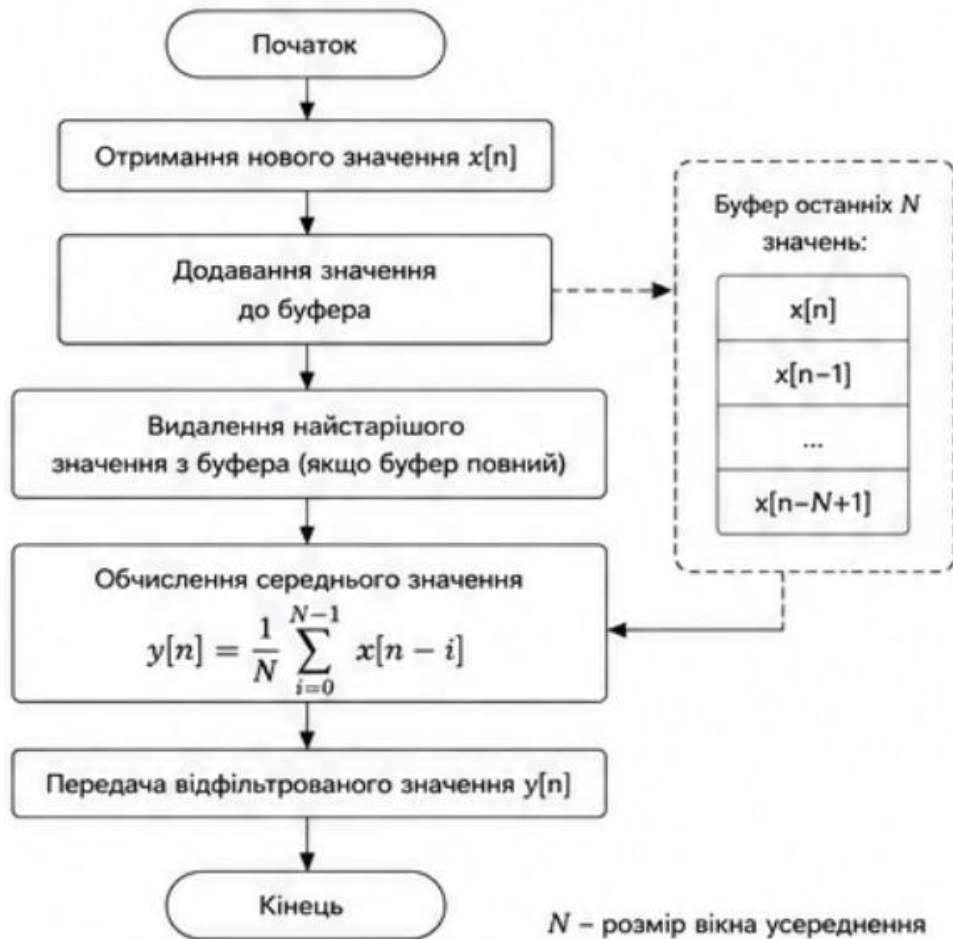


Рисунок 3.4 – Алгоритм фільтрації ковзним середнім

Важливою складовою алгоритмів збору даних є контроль достовірності сенсорної інформації. У системі реалізуються механізми виявлення аномалій, перевірка допустимих діапазонів значень та контроль втрати зв'язку із сенсорами. У разі виникнення помилки активуються алгоритми переходу в безпечний режим роботи або використовується резервне джерело даних. Алгоритм перевірки достовірності даних наведено на рисунку 3.5.

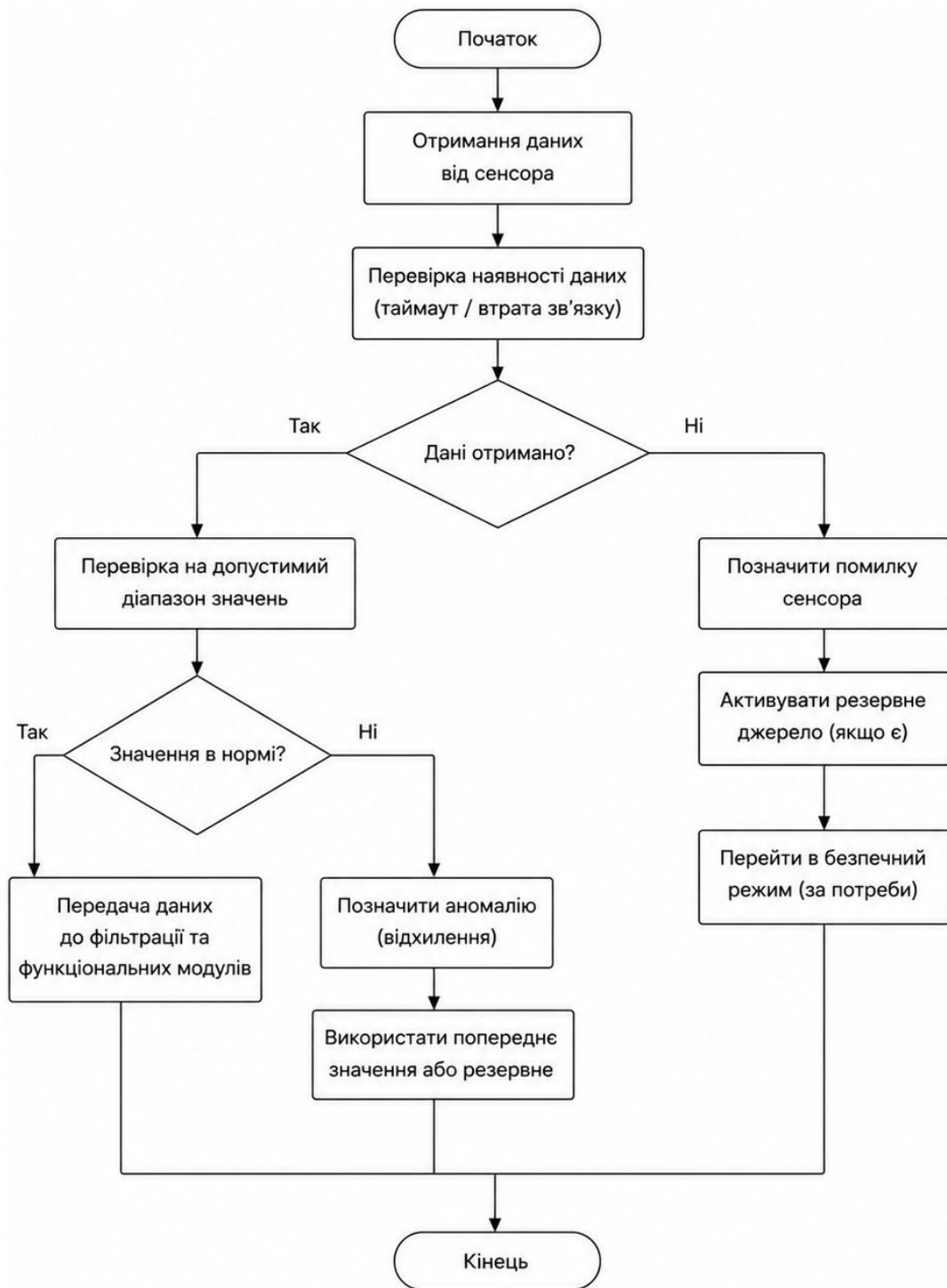


Рисунок 3.5 – Алгоритм перевірки достовірності даних

Таким чином, реалізовані алгоритми збору та фільтрації сенсорних даних забезпечують отримання стабільної та достовірної інформації про стан БПЛА при мінімальних обчислювальних витратах. Це створює основу для ефективної роботи систем стабілізації, навігації та енергоменеджменту в умовах реального часу.

3.4 Алгоритми стабілізації та керування польотом

Алгоритми стабілізації та керування польотом є центральним компонентом програмного забезпечення бортової комп'ютерної системи малого безпілотного літального апарата. Їх основним завданням є забезпечення стійкого положення БПЛА у просторі, компенсація зовнішніх збурень та формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів у режимі реального часу. Ефективність алгоритмів керування безпосередньо впливає на маневреність, точність навігації та безпечність польоту.

У малих БПЛА стабілізація польоту здійснюється на основі даних інерціального вимірювального модуля, який включає акселерометр та гіроскоп. На основі отриманих даних обчислюються кути орієнтації апарата відносно трьох осей: крену (Roll), тангажу (Pitch) та рискання (Yaw). Враховуючи високі вимоги до швидкодії, алгоритми стабілізації виконуються з частотою 100–1000 Гц у контурі реального часу.

У розроблюваній системі для стабілізації польоту використовується PID-регулятор, який є одним із найбільш поширених та ефективних методів керування для embedded-систем. PID-регулятор формує керуючий сигнал на основі поточної помилки між заданим та фактичним значенням параметра керування. Загальний вираз PID-регулятора представлений формулою 3.3.

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.3)$$

де:

$u(t)$ - керуючий сигнал;

$e(t)$ - похибка регулювання;

K_P - коефіцієнт пропорційної складової;

K_I - коефіцієнт інтегральної складової;

K_D - коефіцієнт диференціальної складової.

Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію системи на відхилення, інтегральна компенсує статичну похибку, а диференціальна зменшує перерегулювання та покращує стійкість системи. Комбінація цих компонентів дозволяє досягти плавного та стабільного керування польотом. У системі реалізовано окремі PID-конттури для кожної осі орієнтації. Після обчислення керуючих сигналів формується набір значень для електронних регуляторів швидкості двигунів (ESC), які змінюють швидкість обертання пропелерів. Таким чином забезпечується стабілізація положення апарата у просторі. Для підвищення стійкості керування використовується каскадна структура регуляторів. Зовнішній контур виконує стабілізацію кутів орієнтації, тоді як внутрішній контур регулює кутові швидкості. Такий підхід дозволяє покращити динамічні характеристики системи та зменшити вплив зовнішніх збурень. Крім стабілізації положення, система реалізує базові алгоритми навігаційного керування. На основі GPS-даних та інформації про орієнтацію формується команда руху до заданої точки маршруту. Для цього обчислюється похибка між поточними та цільовими координатами, після чого визначаються необхідні параметри руху БПЛА.

Важливою особливістю програмної реалізації є використання RTOS для забезпечення детермінованого виконання задач керування. Задача стабілізації має найвищий пріоритет у системі та виконується з фіксованим часовим інтервалом. Це дозволяє мінімізувати затримки та забезпечити стабільність роботи PID-регуляторів. Менш критичні до часу виконання процеси, такі як обробка довгострокових навігаційних координат від супутникового модуля та передача телеметрії на наземну станцію, винесені в окремі потоки з нижчим рівнем пріоритету. Взаємодія між цими різнорівневими задачами здійснюється за допомогою безпечних механізмів операційної системи реального часу, зокрема черг повідомлень та семафорів, що запобігає виникненню конфліктів при спільному доступі до даних. Алгоритм стабілізації та керування польотом наведено на рисунку 3.6.

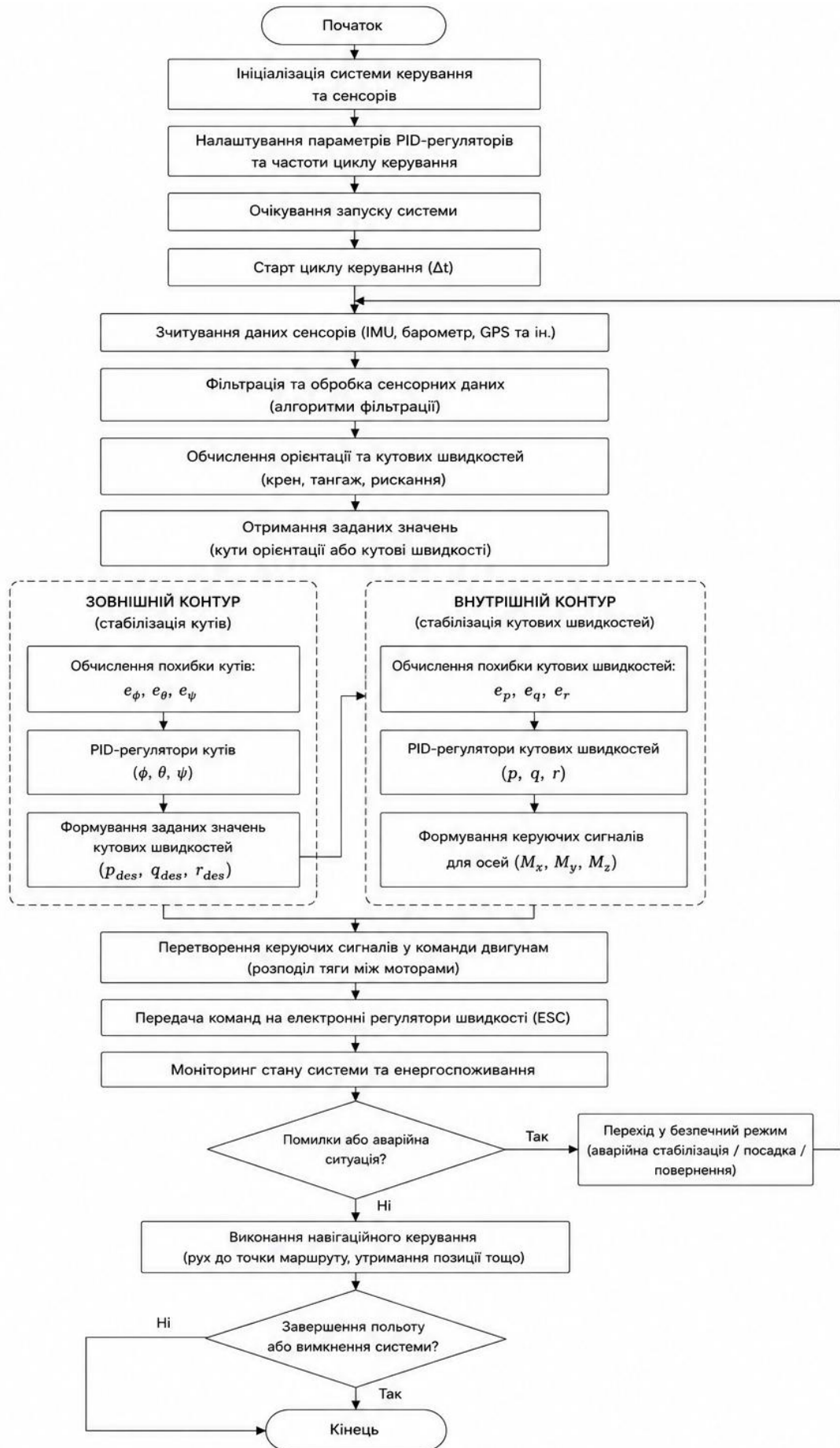


Рисунок 3.6 – Алгоритм стабілізації та керування польотом

Для підвищення надійності алгоритмів реалізовано механізми обмеження керуючих сигналів, перевірки достовірності сенсорних даних та захисту від нестабільних режимів роботи. У випадку втрати даних від сенсорів або виникнення критичних помилок система переходить у безпечний режим функціонування. З огляду на енергоефективну спрямованість бортової комп'ютерної системи, алгоритми керування оптимізовані з точки зору обчислювальної складності. Використання PID-регуляторів забезпечує достатню точність стабілізації при мінімальних обчислювальних витратах, що є важливим для мікроконтролерних платформ із обмеженим енергетичним ресурсом.

3.5 Оптимізація енергоспоживання на програмному рівні

Одним із ключових завдань при розробці бортової комп'ютерної системи малого безпілотного літального апарата є мінімізація енергоспоживання програмних компонентів. Оскільки тривалість автономного польоту безпосередньо залежить від ефективності використання енергетичного ресурсу, програмна оптимізація є важливою складовою загальної концепції енергоефективної архітектури. На відміну від апаратних методів, програмні механізми дозволяють динамічно адаптувати режим роботи системи відповідно до поточного навантаження та умов виконання місії.

У розроблюваній системі оптимізація енергоспоживання реалізується на декількох рівнях: керування режимами роботи процесора, оптимізація виконання задач операційної системи реального часу, адаптивне керування периферійними модулями та зменшення обчислювального навантаження. Одним із базових механізмів є використання режимів енергозбереження мікроконтролера. У періоди відсутності активних задач процесор переводиться у режими низького енергоспоживання (*sleep mode* або *idle mode*). Для цього у FreeRTOS використовується механізм *tickless idle mode*, який дозволяє тимчасово зупинити системний таймер та переводити процесор у режим сну до моменту виникнення переривання або активізації задачі. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити

середню споживану потужність системи. Важливим напрямом оптимізації є динамічне масштабування частоти та навантаження процесора. У системі реалізовано адаптивний підхід, за якого частота виконання окремих задач змінюється залежно від поточного режиму польоту. Наприклад, у режимі зависання або прямолінійного руху з невеликими змінами орієнтації частота обробки навігаційних даних та телеметрії може бути зменшена, що дозволяє скоротити кількість обчислень та енергоспоживання процесора. Окрему увагу приділено оптимізації роботи периферійних модулів. Сенсори, модулі зв'язку та високорівневий обчислювальний модуль активуються лише за необхідності. Наприклад, модуль комп'ютерного зору може працювати у періодичному режимі або запускатися лише під час виконання навігаційних чи аналітичних задач. Такий механізм дозволяє уникнути постійного енергоспоживання ресурсоємних компонентів.

Для зменшення обчислювального навантаження використовуються оптимізовані алгоритми обробки даних. У контурі стабілізації польоту застосовуються PID-регулятори та комплементарний фільтр, які забезпечують достатню точність керування при низьких обчислювальних витратах. Використання складніших алгоритмів, наприклад повного фільтра Калмана або алгоритмів машинного навчання, обмежується лише високорівневим обчислювальним модулем.

Оптимізація також реалізується на рівні організації задач RTOS. Для критичних задач встановлюються високі пріоритети та короткі періоди виконання, тоді як фонові задачі, зокрема журналювання або передача діагностичної інформації, виконуються асинхронно та з меншою частотою. Це дозволяє уникнути перевантаження процесора та зменшити кількість непотрібних циклів обробки. У системі реалізовано моніторинг енергоспоживання, який забезпечує оцінку поточного навантаження та рівня заряду акумулятора. На основі цих даних модуль енергоменеджменту може змінювати режими роботи системи, обмежувати активність другорядних модулів або переводити БПЛА у режим економії енергії. У

критичних ситуаціях активується алгоритм аварійного завершення місії або повернення до точки старту.

Для оцінки ефективності програмної оптимізації використовується показник «продуктивність-потужність», який характеризує співвідношення між кількістю виконуваних обчислень та споживаною потужністю системи та визначається за формулою 3.4.

$$\eta = \frac{P_{comp}}{P_{power}}, \quad (3.4)$$

де P_{comp} - обчислювальна продуктивність системи; P_{power} - споживана потужність.

Збільшення значення цього показника свідчить про більш ефективне використання енергетичних ресурсів. Таким чином, програмна оптимізація енергоспоживання дозволяє суттєво підвищити ефективність роботи бортової комп'ютерної системи малого БПЛА без необхідності зміни апаратної архітектури. Використання режимів енергозбереження, адаптивного керування задачами та оптимізованих алгоритмів обробки даних забезпечує збільшення тривалості автономної роботи та підвищення загальної ефективності функціонування системи.

3.5 Висновки до третього розділу

У даному розділі розроблено програмну архітектуру та алгоритмічне забезпечення бортової комп'ютерної системи малого безпілотного літального апарата. Основну увагу приділено вибору програмної платформи, організації програмної архітектури, реалізації алгоритмів збору та обробки сенсорних даних, стабілізації польоту та оптимізації енергоспоживання на програмному рівні.

Розроблено багаторівневу архітектуру програмного забезпечення, яка включає драйверний рівень, рівень системних сервісів та функціональні модулі. Такий підхід забезпечує модульність, масштабованість та можливість

паралельного виконання задач із різними пріоритетами. Особливу увагу приділено механізмам міжзадачної взаємодії та синхронізації процесів у середовищі RTOS.

Також розроблено алгоритми стабілізації та керування польотом на основі PID-регуляторів. Використання каскадної структури контурів керування дозволило забезпечити стійку стабілізацію БПЛА за кутами орієнтації та кутовими швидкостями. Запропонований підхід забезпечує роботу системи в режимі реального часу та дозволяє компенсувати вплив зовнішніх збурень. Окрему увагу приділено оптимізації енергоспоживання на програмному рівні. Реалізовано механізми переходу процесора у режими зниженого енергоспоживання, адаптивного керування частотою виконання задач та динамічного керування активністю периферійних модулів. Використання режиму tickless idle mode у FreeRTOS дозволило зменшити середнє енергоспоживання системи та підвищити тривалість автономної роботи БПЛА.

Таким чином, у третьому розділі сформовано програмно-алгоритмічну основу енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА. Запропоновані програмні рішення забезпечують стабільність роботи, підтримку задач реального часу та ефективне використання енергетичних ресурсів, що створює основу для подальшого експериментального дослідження ефективності системи.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

4.1 Експериментальна апробація реалізації модуля комп'ютерного зору на базі архітектури YOLO

Одним із перспективних напрямів розвитку сучасних бортових комп'ютерних систем малих безпілотних літальних апаратів є інтеграція модулів комп'ютерного зору, які забезпечують автономне виявлення та аналіз об'єктів у режимі реального часу. Реалізація таких алгоритмів дозволяє розширити функціональні можливості БПЛА, зокрема у задачах навігації, моніторингу територій, супроводження об'єктів та виявлення перешкод.

У межах даної роботи проведено експериментальну апробацію модуля комп'ютерного зору на основі архітектури YOLO. Вибір даної архітектури обумовлений її високою швидкістю, можливістю роботи в режимі реального часу та відносно низькими обчислювальними витратами у порівнянні з іншими моделями глибокого навчання для задач детекції об'єктів. Архітектура YOLO базується на принципі одноетапного виявлення об'єктів, при якому нейронна мережа одночасно виконує локалізацію та класифікацію об'єктів у межах одного проходу через модель. Це дозволяє значно зменшити затримки обробки відеопотоку та забезпечити високу швидкість роботи системи. На рисунку 4.1 наведено схему модуля комп'ютерного зору на базі архітектури YOLO. Структурно модуль комп'ютерного зору складається з підсистеми отримання відеоданих, блоку попередньої обробки зображення, нейромережевого модуля детекції та блоку передачі результатів до функціональних модулів БПЛА. Відеопотік надходить із камери у вигляді послідовності кадрів, після чого виконується масштабування та нормалізація зображення відповідно до вимог моделі YOLO.

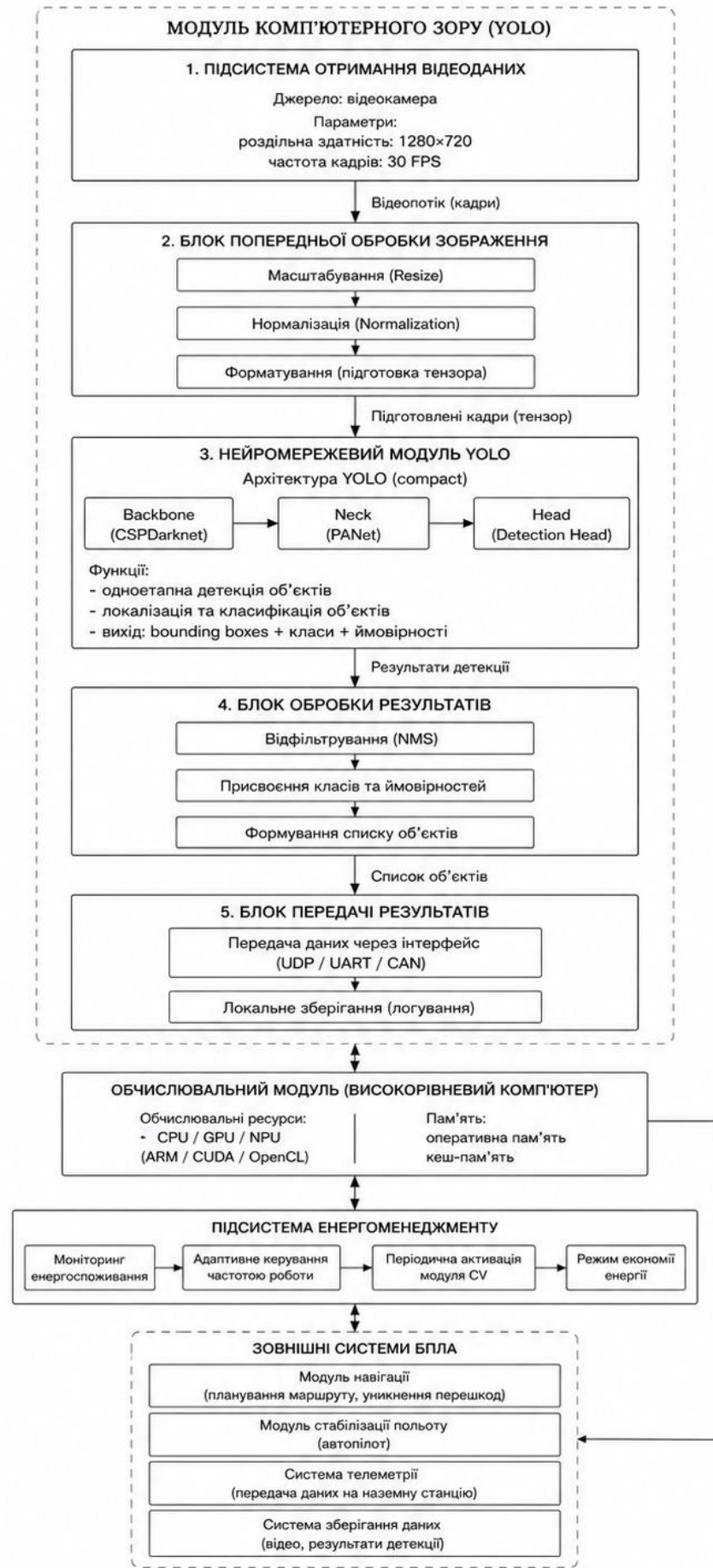


Рисунок 4.1 – Схема модуля комп'ютерного зору на базі архітектури YOLO

Далі кадри передаються до нейронної мережі для виконання детекції об'єктів. Для оцінювання швидкодії використовувався показник FPS, який характеризує кількість кадрів, що обробляються за одну секунду. Експериментальні результати показали, що використання компактної моделі YOLO дозволяє забезпечити обробку відеопотоку в режимі реального часу при помірному енергоспоживанні.

У процесі експериментального дослідження було проведено навчання нейромережевої моделі YOLO11n для задач автоматичного виявлення людей та транспортних засобів на аерофотозображеннях, отриманих з безпілотного літального апарата (використано набір даних з відкритим доступом [92]). На рисунку 4.2 наведено приклади зображень з набору даних, а саме зображення об'єктів з аерофотозйомки за допомогою БПЛА.



Рисунок 4.2 – Приклад зображення об'єктів з аерофотозйомки за допомогою БПЛА[92]

Метою експерименту була перевірка можливості інтеграції компактної моделі комп'ютерного зору у склад енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА та оцінка її ефективності в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Для навчання моделі використовувалася архітектура YOLO11n, яка є компактною модифікацією сімейства YOLO та орієнтована на роботу в embedded-системах і edge-пристроях. Вибір даної архітектури обумовлений її невеликим обсягом моделі, високою швидкістю та можливістю виконання розпізнавання об'єктів у режимі реального часу при помірному енергоспоживанні.

У процесі навчання використовувалася попередньо натренована модель yolol1n.pt, що дозволило застосувати підхід transfer learning та скоротити час навчання. Навчання виконувалося протягом 25 епох із використанням графічного процесора. Розмір вхідного зображення становив 640×640 пікселів, що є компромісом між точністю розпізнавання та швидкістю обробки.

Основними показниками оцінювання ефективності моделі є Precision - точність класифікації об'єктів, Recall - повнота виявлення, mAP50 - середня точність при порозі IoU = 0.5 та mAP50-95 - інтегральний показник якості моделі. Результати навчання наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати навчання моделі YOLO11n

Показник	1-ша епоха	25-та епоха	Зміна
train/box_loss	1.93495	1.49015	-22.99%
train/cls_loss	1.62821	0.81199	-50.13%
train/dfl_loss	1.02118	0.90807	-11.08%
val/box_loss	1.82215	1.50259	-17.54%
val/cls_loss	1.23164	0.82388	-33.11%

Кінець таблиці 4.1

val/df_l_loss	0.98053	0.89454	-8.77%
Precision	0.49595	0.64121	+29.29%
Recall	0.33627	0.46541	+38.40%
mAP50	0.34802	0.50903	+46.26%
mAP50-95	0.17273	0.27182	+57.37%

Аналіз отриманих результатів свідчить про ефективність процесу навчання моделі. Значення train/cls_loss зменшилося більш ніж на 50%, що вказує на суттєве покращення здатності моделі правильно класифікувати об'єкти. Зменшення train/box_loss та val/box_loss підтверджує підвищення точності локалізації об'єктів на зображеннях. Особливо важливим є зростання інтегрального показника mAP50-95 з 0.17273 до 0.27182, що свідчить про загальне покращення якості роботи моделі на тестовій вибірці. Показник mAP50 досяг значення 0.50903, що підтверджує можливість ефективного виявлення людей та транспортних засобів навіть за складних умов аерозйомки.

Під час експерименту також проводилася візуальна оцінка роботи моделі. На рисунках 4.3-4.5 наведено основні метрики оцінювання якості роботи моделі YOLO11n після завершення процесу навчання. Аналіз графіків дозволяє оцінити ефективність детекції об'єктів, оптимальний рівень порогу впевненості та збалансованість між точністю і повнотою виявлення. На рисунку 4.3 наведено криву Precision-Confidence, яка демонструє залежність точності класифікації від порогу впевненості. На графіку видно, що зі збільшенням порогу confidence точність моделі поступово зростає для обох класів об'єктів.

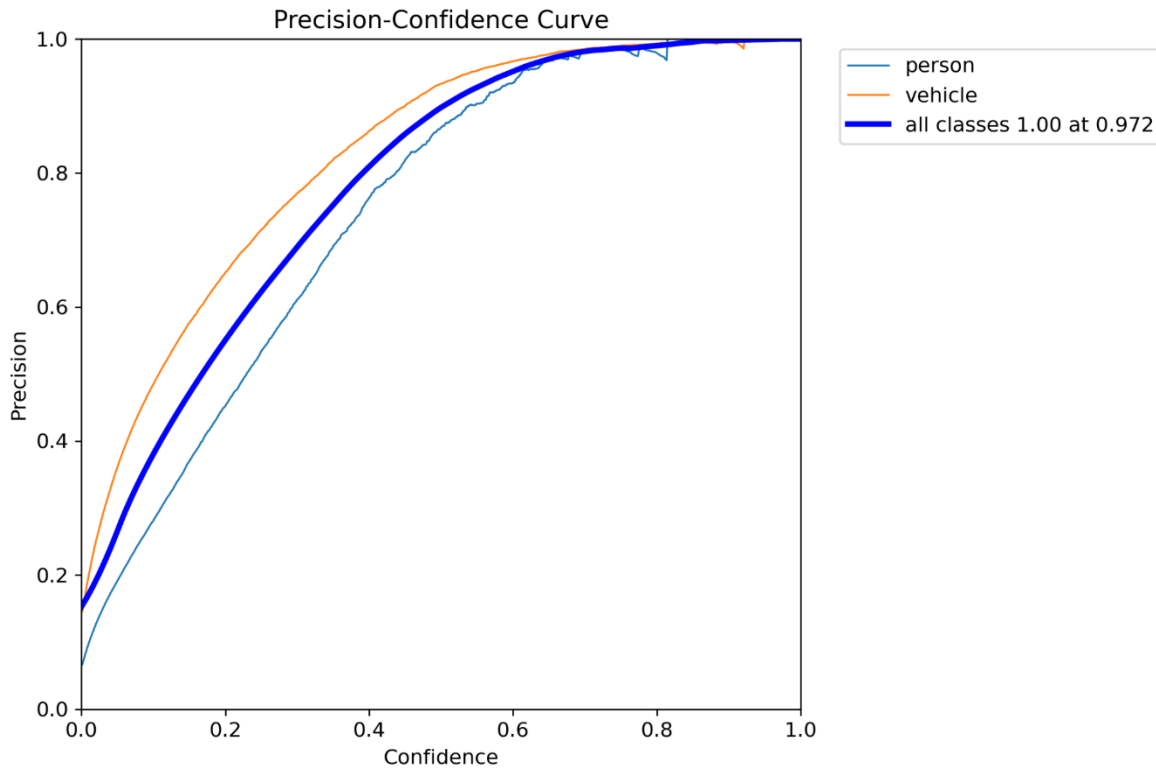


Рисунок 4.3 – Крива Precision-Confidence

Найкращі результати спостерігаються для класу “vehicle”, для якого крива розташована вище за клас person практично на всьому діапазоні значень. Це свідчить про те, що модель значно краще розпізнає транспортні засоби, ніж людей на аерофотозображеннях. Для класу “vehicle” точність наближається до значення 1.0 вже при впевненості $\approx 0.7-0.8$, тоді як для класу “person” аналогічний рівень досягається лише при впевненості понад 0.9. Така різниця пояснюється складністю виявлення людей на зображеннях з БПЛА через менші розміри об’єктів, часткові перекриття та меншу деталізацію. Сумарна крива “all classes” показує, що при впевненості = 0.972 модель досягає точності ≈ 1.00 , тобто практично всі знайдені об’єкти класифікуються правильно. Проте надмірне збільшення порогу впевненості може призводити до втрати частини об’єктів, що негативно впливає на криву Recall.

На рисунку 4.4 наведено криву Precision-Recall, яка є одним із найбільш важливих показників якості нейромережевої моделі. Вона демонструє компроміс

між точністю та повнотою виявлення. Площа під PR-кривою фактично відповідає показнику середньої точності для кожного класу.

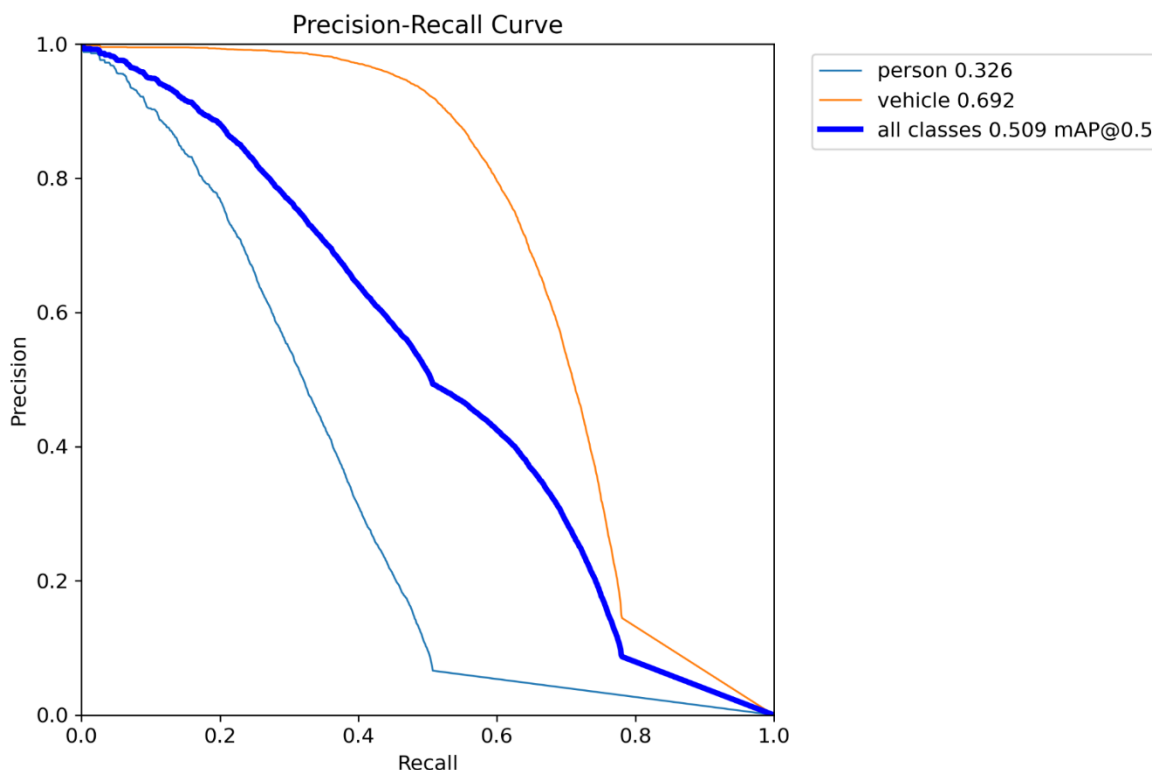


Рисунок 4.4 – Крива Precision-Recall

Для класу “vehicle” отримано значення $AP \approx 0.692$, що свідчить про достатньо високу якість виявлення транспортних засобів. Крива має плавний характер і тривалий час утримує високі значення Precision навіть при збільшенні Recall, що вказує на стабільну роботу моделі. Для класу person значення AP становить лише 0.326. Крива різко спадає при збільшенні Recall, що означає погіршення точності при спробі виявити більшу кількість людей. Така поведінка характерна для задач виявлення малорозмірних об’єктів на аерофотозображеннях. Середнє значення $mAP@0.5$ для всіх класів становить 0.509, що підтверджує працездатність моделі та можливість її використання у задачах комп’ютерного зору для БПЛА. Водночас результати свідчать про необхідність подальшої оптимізації моделі для покращення детекції людей.

На рисунку 4.5 наведено криву F1-Confidence, яка відображає залежність показника F1 від порогу впевненості. Метрика F1 є гармонійним середнім між Precision та Recall і характеризує загальну збалансованість моделі.

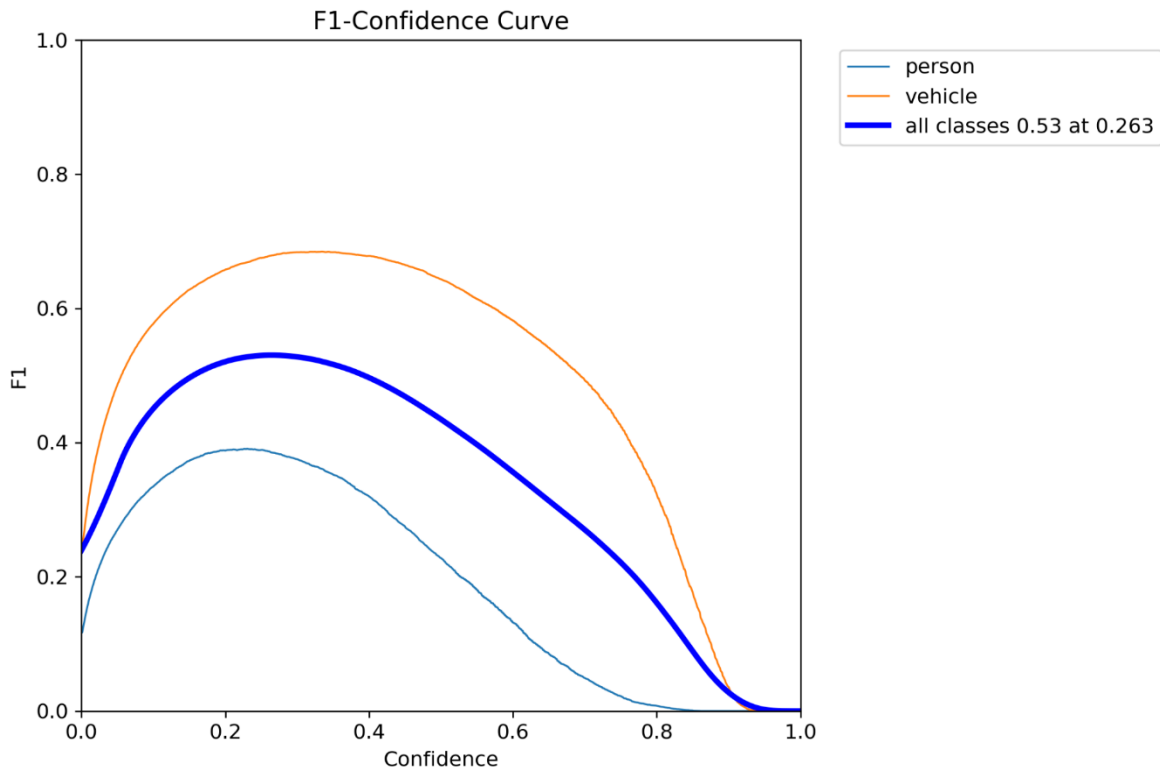


Рисунок 4.4 – F1-Confidence

Максимальне значення F1 для всіх класів становить приблизно 0.53 при значенні показника впевненості ≈ 0.263 . Це означає, що саме в цій точці досягається найкращий баланс між точністю та повнотою виявлення об'єктів. Для класу "vehicle" показник F1 досягає приблизно 0.68, що підтверджує високу ефективність моделі при виявленні транспортних засобів. Для класу "person" максимальне значення F1 становить близько 0.39, що ще раз підтверджує складність задачі виявлення людей на аерофотозображеннях. Аналіз кривої також показує, що при збільшенні confidence понад 0.7 значення F1 починає швидко зменшуватися. Це пояснюється тим, що хоча Precision зростає, Recall суттєво падає через втрату частини об'єктів.

Загалом аналіз отриманих метрик дозволяє зробити висновок, що навчена модель YOLO11n демонструє задовільну ефективність для реалізації задач автоматичного виявлення об'єктів у бортових комп'ютерних системах малих БПЛА. Найкращі результати досягнуто для детекції транспортних засобів, тоді як виявлення людей потребує додаткового вдосконалення моделі.

На рисунку 4.6 відображено результати процесу навчання нейромережевої моделі YOLO11n для задач виявлення людей та транспортних засобів на аерофотозображеннях.

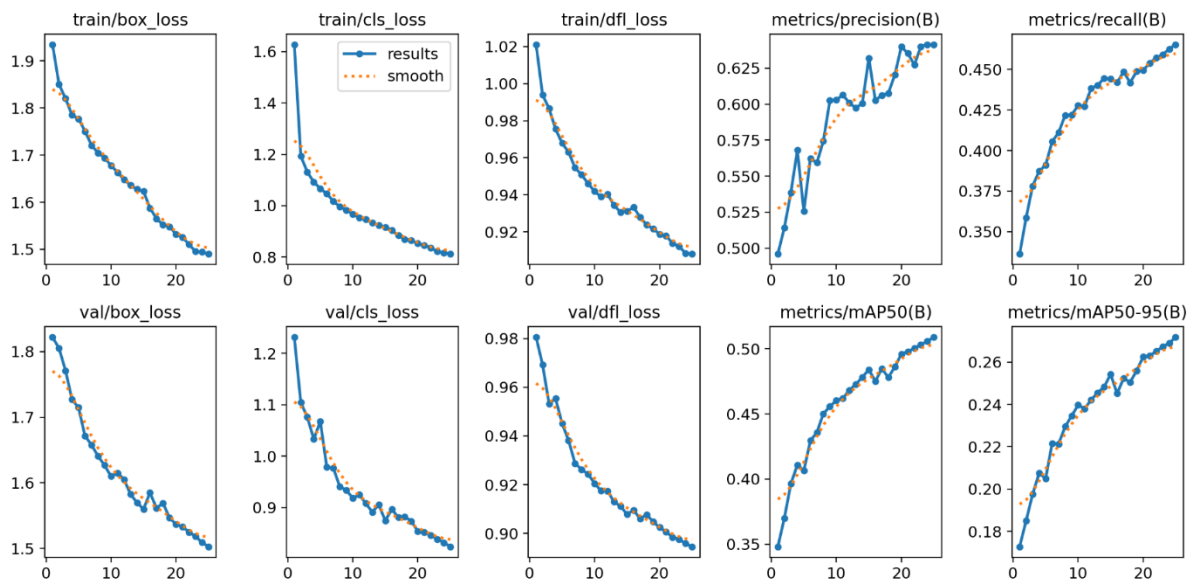


Рисунок 4.6 – Результати процесу навчання нейромережевої моделі YOLO11n для задач виявлення людей та транспортних засобів на аерофотозображеннях

Аналіз отриманих залежностей дозволяє оцінити стабільність навчання моделі, динаміку покращення основних метрик та якість роботи алгоритму комп'ютерного зору в умовах використання у складі бортової комп'ютерної системи малого БПЛА. Перший набір графіків демонструє зміну функцій втрат та основних метрик якості протягом 25 епох навчання. Верхній ряд графіків відображає параметри навчальної вибірки, а нижній - результати валідації моделі. Графік train/box_loss характеризує похибку локалізації об'єктів під час навчання. Спостерігається стабільне зниження значення функції втрат від приблизно 1.93 на

першій епосі до близько 1.49 на завершальному етапі навчання. Це свідчить про поступове покращення здатності моделі точно визначати координати об'єктів на зображенні. Відсутність різких стрибків або нестабільностей на графіку підтверджує коректність процесу навчання та достатню збалансованість вибірки даних.

Аналогічна тенденція спостерігається на графіку `train/cls_loss`, який відповідає за помилки класифікації об'єктів. Значення даної функції втрат зменшилося майже вдвічі - з 1.62 до 0.81. Це вказує на суттєве покращення здатності нейронної мережі правильно розпізнавати класи «person» та «vehicle». Найбільш інтенсивне зниження спостерігається на перших 10 епохах, після чого модель переходить у режим поступової оптимізації параметрів. Графік `train/dfl_loss` характеризує ефективність `Distribution Focal Loss` - компонента функції втрат, яка використовується для більш точної локалізації меж об'єктів. Зниження значення від 1.02 до 0.91 свідчить про підвищення точності визначення `bounding box`. Нижній ряд графіків демонструє результати валідації моделі на тестовій вибірці. Графіки `val/box_loss`, `val/cls_loss` та `val/dfl_loss` мають аналогічну тенденцію до зменшення, що підтверджує відсутність явного перенавчання. Оскільки значення валідаційних функцій втрат змінюються синхронно з тренувальними, можна зробити висновок про хорошу узагальнювальну здатність моделі. Особливу увагу слід приділити графікам `metrics/precision(B)` та `metrics/recall(B)`. Показник `Precision` збільшився приблизно з 0.50 до 0.64, що означає зменшення кількості хибнопозитивних спрацювань системи. Одночасно `Recall` зріс із 0.34 до 0.46, що свідчить про покращення здатності моделі знаходити більшу кількість об'єктів на зображенні. Графік `metrics/mAP50(B)` демонструє поступове зростання середньої точності детекції при $\text{IoU} = 0.5$. На завершальному етапі навчання показник досягає значення близько 0.51. Це свідчить про задовільну якість роботи моделі для задач `embedded-комп'ютерного зору`. Інтегральний показник `metrics/mAP50-95(B)`, який є більш жорстким критерієм оцінювання, збільшився з 0.17 до приблизно 0.27. Хоча це значення є помірним, воно підтверджує можливість практичного

використання компактної моделі YOLO11n на енергоефективних платформах БПЛА.

На рисунку 4.7 наведено графік результатів навчання нейромережевої моделі YOLO11s протягом 25 епох.

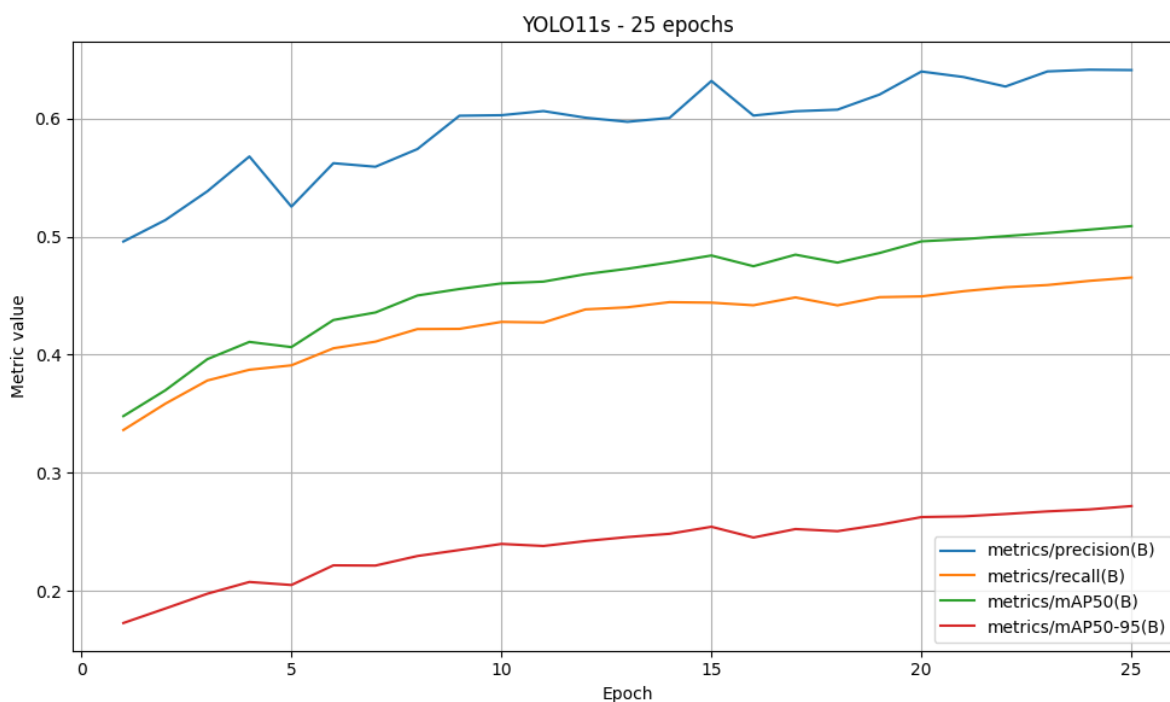


Рисунок 4.7 – Графік результатів навчання нейромережевої моделі YOLO11s протягом 25 епох.

Він узагальнює динаміку зміни основних метрик протягом навчання. На ньому чітко видно, що всі ключові показники мають стабільну тенденцію до зростання. Найшвидше зростає Precision, тоді як mAP50-95 покращується більш поступово через складність задачі локалізації малорозмірних об'єктів на аерофотознімках. Після приблизно 15–20 епох темпи покращення метрик помітно знижуються, що свідчить про наближення моделі до локального оптимуму. Це означає, що подальше збільшення кількості епох без зміни архітектури моделі або набору даних не призведе до суттєвого покращення результатів.

На рисунках 4.8-4.9 наведено матрицю помилок (рисунок 4.8) та нормалізовану матрицю помилок (рисунок 4.9), які характеризують якість роботи

нейромережевої моделі YOLO11n під час класифікації та локалізації об'єктів класів «person» та «vehicle».

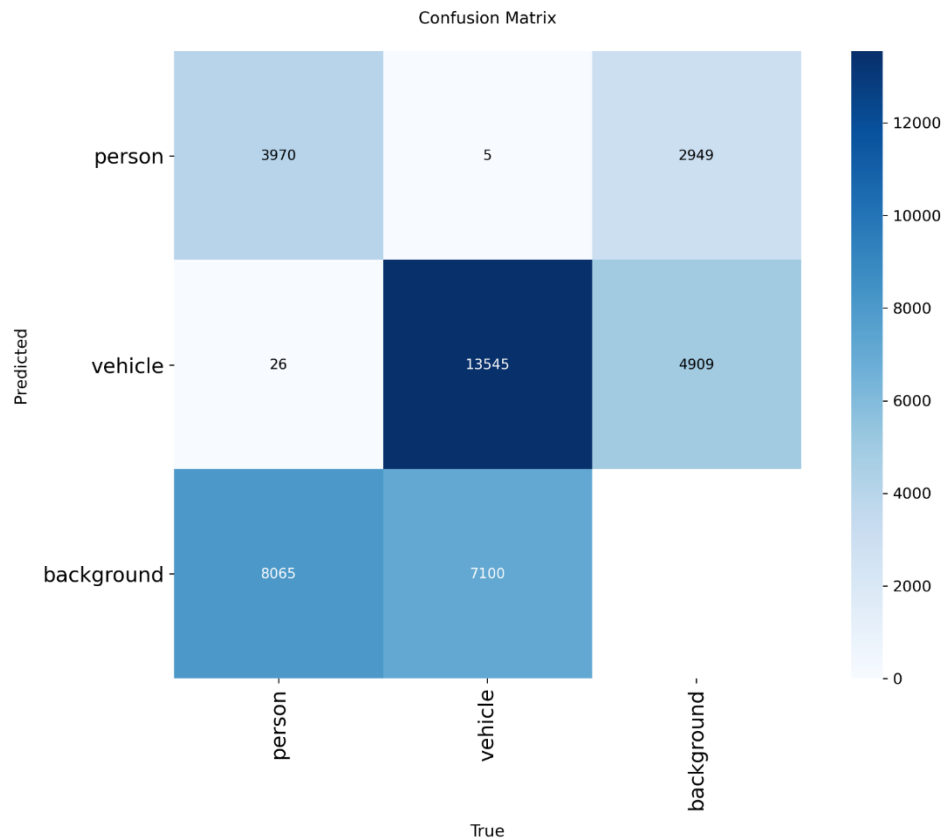


Рисунок 4.8 – Матриця помилок

Аналіз матриці помилок дозволяє детально оцінити ефективність моделі, визначити основні типи помилок та виявити слабкі місця алгоритму комп'ютерного зору. Перша матриця відображає абсолютну кількість передбачень моделі. По горизонтальній осі наведено реальні класи об'єктів, а по вертикальній - класи, які були передбачені моделлю. Найбільше коректних спрацювань спостерігається для класу “vehicle”. Модель правильно класифікувала 13545 транспортних засобів, що свідчить про високу якість виявлення даного типу об'єктів. При цьому кількість помилкових класифікацій між класами person та vehicle є незначною: лише 5 транспортних засобів було помилково визначено як людей, а 26 людей як транспортні засоби. Це свідчить про достатньо хороше розділення класів у просторі

ознак нейромережі. Разом із тим, матриця демонструє значну кількість пропущених об'єктів, які були віднесені до класу background. Для класу “person” модель не виявила 8065 об'єктів, а для vehicle - 7100 об'єктів. Це означає, що основною проблемою моделі є не помилкова класифікація між класами, а недостатня повнота виявлення, особливо для малорозмірних об'єктів. Крім того, спостерігається значна кількість хибнопозитивних спрацювань для фону. Наприклад, 2949 фонових областей були класифіковані як людина, а 4909 як vehicle. Це вказує на те, що модель у деяких випадках помилково інтерпретує елементи зображення як об'єкти інтересу. Подібна проблема характерна для задач аерофотозйомки через складний фон, низьку деталізацію та наявність об'єктів схожої форми.

Нормалізована матриця помилок (рисунок 4.9) дозволяє оцінити результати у відносних величинах та краще порівняти ефективність моделі для різних класів. Для класу “person” правильність виявлення становить приблизно 33%, тоді як близько 67% реальних об'єктів цього класу були віднесені до “background”. Це підтверджує складність задачі детекції людей на аерофотозображеннях.

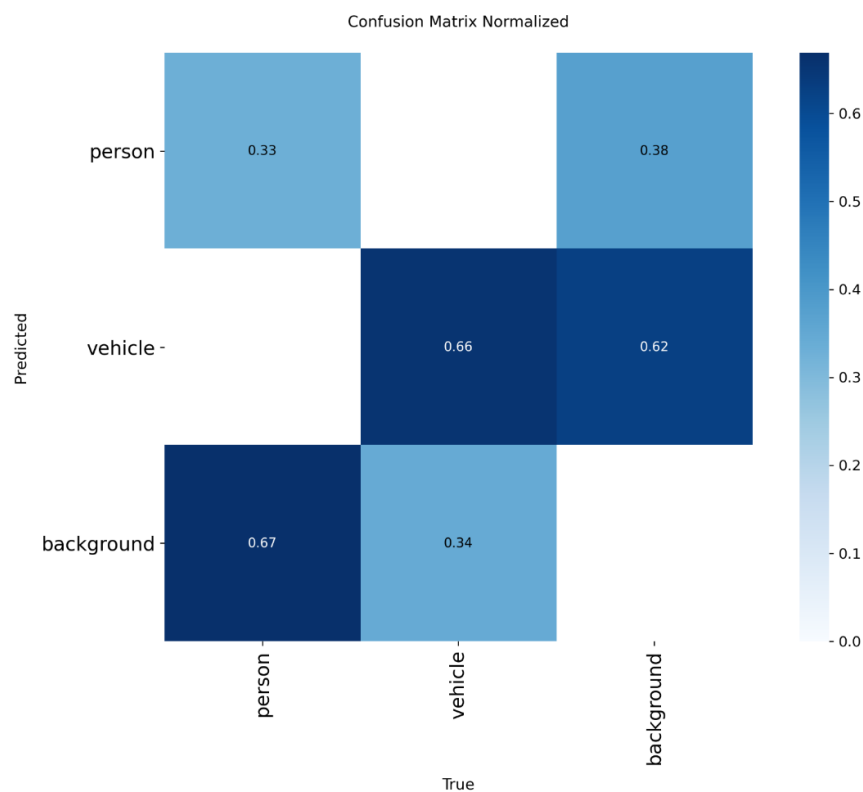


Рисунок 4.9 – Нормалізована матриця помилок

Основними причинами такого результату є малі розміри людей на кадрах із БПЛА, низька просторова роздільна здатність, часткові перекриття об'єктів або значні зміни масштабу та освітлення. Для класу “vehicle” результати значно кращі. Модель правильно виявляє приблизно 66% транспортних засобів, тоді як близько 34% залишаються невиявленими. Це свідчить про значно кращу здатність нейромережі працювати з більшими та більш контрастними об'єктами. Особливу увагу слід приділити стовпцю “background”. Приблизно 62% фонових областей модель інтерпретує як транспортні засоби, а 38% як людей. Це означає, що модель має певну схильність до хибнопозитивних спрацювань, особливо у складних сценах.

З точки зору практичного використання у бортовій комп'ютерній системі малого БПЛА отримані результати можна вважати задовільними для компактної моделі класу YOLO11n, орієнтованої на енергоефективні embedded-платформи. При цьому слід враховувати компроміс між точністю роботи моделі та її обчислювальною складністю. Використання більш складних моделей могло б покращити Recall, однак призвело б до збільшення навантаження на бортову обчислювальну систему та підвищення енергоспоживання. Проведений аналіз матриць помилок дозволяє сформулювати основні напрями подальшого покращення моделі:

- 1) збільшення обсягу навчальної вибірки для класу “person”;
- 2) використання спеціалізованих наборів даних аерофотозйомки;
- 3) застосування методів аугментації зображень;
- 4) підвищення роздільної здатності вхідних кадрів;
- 5) використання більшої модифікації YOLO;
- 6) оптимізація порогу впевненості та NMS-параметрів;
- 7) додаткове навчання моделі на специфічних сценаріях польоту БПЛА.

Таким чином, результати аналізу матриці помилок підтверджують працездатність запропонованого модуля комп'ютерного зору та можливість його інтеграції у склад енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА. Модель демонструє достатню точність виявлення транспортних засобів та

прийнятну якість роботи для задач реального часу в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

На рисунках 4.10-4.11 наведено приклади результатів роботи нейромережевої моделі YOLO11n під час обробки тестових аерофотозображень. Рисунок 4.10 містить результати передбачення моделі, а рисунок 4.11 - еталонні розмітки тестової вибірки, що використовувалися для оцінювання якості детекції. Аналіз наведених зображень дозволяє оцінити практичну ефективність розробленого модуля комп'ютерного зору в умовах використання у складі бортової комп'ютерної системи малого БПЛА. На рисунку 4.10 відображено результати автоматичного виявлення об'єктів після проходження зображень через нейронну мережу. Модель виконує детекцію двох класів об'єктів “person” та “vehicle” із зазначенням коефіцієнта впевненості для кожного знайденого об'єкта. Аналіз результатів показує, що модель достатньо ефективно виявляє транспортні засоби на аерофотознімках.



Рисунок 4.10 – Результати передбачення моделі



Рисунок 4.11 – Еталонні розмітки тестової вибірки з класами “person” та “vehicle”

Для більшості автомобілів значення confidence перебуває в межах 0.7–0.9, що свідчить про високу впевненість нейронної мережі у правильності класифікації. Особливо добре модель працює на зображеннях із високою контрастністю, достатнім освітленням, великими об’єктами та чіткими контурами транспортних засобів.

У той же час розпізнавання людей є значно складнішою задачею. Для класу “person” значення коефіцієнта впевненості переважно перебувають у межах 0.3–0.7. Це пояснюється малими геометричними розмірами людей на аерофотозображеннях та недостатньою деталізацією окремих об’єктів. У багатьох випадках модель виявляє людей лише частково або створює декілька перекривних bounding box для одного об’єкта. На рисунку 4.10 також помітна значна кількість хибнопозитивних спрацювань. Зокрема, окремі елементи дорожньої інфраструктури помилково класифікуються як транспортні засоби, тіні, контури будівель або дрібні об’єкти інтерпретуються як люди, спостерігаються множинні перекривні детекції одного й того ж об’єкта. Особливо помітними є проблеми на сценах із високою щільністю об’єктів, складним фоном та значною кількістю

дрібних деталей. У таких випадках нейромережа генерує велику кількість обмежувальних рамок з низьким або середнім рівнем впевненості. Це характерно для компактних моделей класу YOLO11n, орієнтованих на роботу в реальному часі на вбудованих платформах із обмеженими ресурсами. Рисунок 4.11 містить еталонну розмітку тестових зображень, створену вручну. Порівняння еталонних позначень із результатами передбачення дозволяє оцінити якість локалізації об'єктів та ступінь відповідності результатів роботи моделі реальним даним.

Порівняльний аналіз показує, що модель у більшості випадків правильно визначає розташування великих транспортних засобів та об'єктів із чіткими контурами. Водночас для малих об'єктів спостерігаються пропуски детекції, зміщення меж обмежувальних рамок, дублювання рамок або неточне позиціонування об'єктів. На окремих кадрах модель демонструє погіршення якості роботи в умовах слабкого освітлення, нічної зйомки, часткового перекриття об'єктів, складного рельєфу місцевості та низької контрастності. Особливо складними для моделі є сцени з великою кількістю людей або транспортних засобів, де відстань між об'єктами є малою. У таких випадках виникають проблеми сегментації та розділення окремих екземплярів об'єктів.

Разом із тим результати демонструють, що модель здатна виконувати одночасну детекцію значної кількості об'єктів у режимі реального часу, що є важливою вимогою для бортових систем малих БПЛА. Компактна архітектура YOLO11n забезпечує компроміс між швидкістю та точністю, що дозволяє використовувати модель на енергоефективних ARM-платформах без застосування високопродуктивних графічних прискорювачів.

Практичний аналіз отриманих результатів підтверджує працездатність запропонованого модуля комп'ютерного зору та можливість його використання для автоматичного моніторингу місцевості, виявлення транспортних засобів, пошуку людей, задач ситуаційної обізнаності, підтримки автономної навігації БПЛА або систем спостереження та відеоаналітики.

4.2 Висновки до четвертого розділу

У даному розділі було проведено експериментальну апробацію розробленого модуля комп'ютерного зору для бортової комп'ютерної системи малого безпілотного літального апарата на основі нейромережевої архітектури YOLO11n. Основну увагу приділено дослідженню ефективності автоматичного виявлення людей та транспортних засобів на аерофотозображеннях в умовах обмежених обчислювальних ресурсів embedded-платформи.

У ході роботи було виконано навчання моделі YOLO11n на спеціалізованому наборі даних аерофотозйомки із використанням 25 епох навчання та вхідного розміру зображень 640×640 пікселів. Проведений аналіз динаміки функцій втрат показав стабільне зниження значень `train/box_loss`, `train/cls_loss` та `train/df_l_loss`, що свідчить про коректний процес оптимізації параметрів нейронної мережі. Аналогічна тенденція спостерігалась і для валідаційних метрик, що підтверджує відсутність суттєвого перенавчання моделі.

За результатами експериментів встановлено, що модель досягла значення $mAP@0.5 \approx 0.51$ та $mAP@0.5:0.95 \approx 0.27$, що є прийнятним результатом для компактної нейромережевої архітектури, орієнтованої на використання в енергоефективних бортових системах реального часу. Показник Precision досяг приблизно 0.64, а Recall - близько 0.46, що свідчить про достатню точність класифікації при помірній повноті виявлення об'єктів.

Проведений аналіз Precision-Recall та F1-метрик показав, що модель значно ефективніше виявляє транспортні засоби, ніж людей. Для класу vehicle отримано високі показники точності та стабільну роботу алгоритму навіть при складних умовах зйомки. Водночас розпізнавання людей виявилася більш складною задачею через малі розміри об'єктів, низьку деталізацію та складний фон аерофотозображень.

Практичне тестування моделі на реальних аерофотозображеннях продемонструвало можливість одночасного виявлення значної кількості об'єктів у режимі реального часу. Отримані результати підтвердили працездатність

запропонованого модуля комп'ютерного зору та можливість його інтеграції у склад енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА. Проведене дослідження показало, що використання компактних нейромережових архітектур сімейства YOLO є доцільним для embedded-систем із обмеженими енергетичними та обчислювальними ресурсами. При цьому забезпечується компроміс між швидкістю, точністю розпізнавання та енергоспоживанням бортової системи.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу розроблення бортової комп'ютерної системи для малих безпілотних літальних апаратів на основі енергоефективної архітектури. Актуальність роботи зумовлена стрімким розвитком безпілотних технологій та необхідністю створення компактних, продуктивних і енергоефективних вбудованих систем, здатних забезпечувати автономне функціонування БПЛА в умовах обмежених обчислювальних і енергетичних ресурсів.

У процесі виконання роботи було проведено аналіз особливостей малих БПЛА, сучасних архітектур бортових комп'ютерних систем та підходів до забезпечення енергоефективності вбудованих платформ. Розглянуто сучасні мікропроцесорні архітектури ARM, RISC-V та SoC, виконано їх порівняльний аналіз за критеріями продуктивності, енергоспоживання та придатності до використання у складі бортових систем реального часу. На основі проведеного аналізу обґрунтовано вибір енергоефективної апаратної платформи для реалізації бортової комп'ютерної системи малого БПЛА.

У роботі розроблено структурну архітектуру бортової комп'ютерної системи, що включає модулі керування польотом, збору та обробки сенсорної інформації, енергоменеджменту, телеметрії та комп'ютерного зору. Запропонована архітектура забезпечує модульність, масштабованість та можливість інтеграції сучасних алгоритмів штучного інтелекту в системах реального часу.

Також було розроблено програмну архітектуру системи із застосуванням підходів RTOS та елементів багатозадачної обробки даних. Реалізовано алгоритми збору, фільтрації та перевірки достовірності сенсорних даних, а також алгоритми стабілізації та керування польотом. Окрему увагу приділено методам оптимізації енергоспоживання на програмному рівні, зокрема використанню режимів енергозбереження, оптимізації частоти опитування сенсорів та раціонального розподілу обчислювальних ресурсів.

Практичною частиною роботи стала реалізація модуля комп'ютерного зору на базі нейромережевої архітектури YOLO11n для автоматичного виявлення людей та транспортних засобів на аерофотозображеннях. Проведено навчання та тестування моделі на спеціалізованому наборі даних, а також виконано аналіз основних метрик якості роботи системи. За результатами експериментів отримано значення mAP@0.5 близько 0.51, що підтверджує працездатність моделі в умовах використання на енергоефективних вбудованих платформах.

Проведений аналіз результатів показав, що запропонована система забезпечує прийнятний рівень точності виявлення об'єктів при помірному обчислювальному навантаженні та низькому енергоспоживанні. Найкращі результати отримано для виявлення транспортних засобів, тоді як задачі детекції людей потребують подальшого вдосконалення шляхом розширення навчальної вибірки та оптимізації архітектури нейронної мережі.

Таким чином, у ході виконання магістерської роботи всі поставлені задачі було успішно вирішено, а мету дослідження досягнуто. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих рішень та можливість їх практичного використання у складі сучасних бортових комп'ютерних систем малих безпілотних літальних апаратів для задач автономної навігації, моніторингу, відеоаналітики та ситуаційної обізнаності.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Інженер БПЛА. Базовий курс. Prometheus. URL: <https://courses.prometheus.org.ua/assets/courseware> (дата звернення 19.02.26)
2. БПЛА: типи, класифікації та основні характеристики пояснені. URL: <https://www.uavmodel.com/uk/blogs> (дата звернення 19.02.26)
3. Sembiring J., Sasongko R. A., Bastian E. I., Raditya B. A., Limansubroto R. E. A deep learning approach for trajectory control of tilt-rotor UAV. *Aerospace*. 2024. Vol. 11, No 1. P. 96. DOI: 10.3390/aerospace11010096.
4. Сокольський С. О., Ревенко В. Б., Карашук Н. Н. Огляд методів виявлення та локалізації малих безпілотних літальних апаратів. *Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка, радіоапаратобудування*. 2021. № 87. С. 46–55. DOI: 10.20535/RADAR.2021.87.46-55
5. Гуджеджіані Д. В. Класифікація БПЛА. *Матеріали ІІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. 2023. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2023/paper/view/18636> (дата звернення: 12.02.2026).
6. Курячий Р. О., Книш Б. П. Система автоматичного з'єднання безпілотних вантажних літальних апаратів. *Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. 2020. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzp/all-frtzp-2020/paper/view/9050> (дата звернення: 12.02.2026).
7. Проценко М. І. Класифікація безпілотних літальних апаратів та їх використання. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи»*. 2023. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2023/paper/view/18863> (дата звернення: 12.02.2026)
8. Романюк О. Н., Коваль Л. Г., Бажан В. М. Програмне забезпечення БПЛА. *Матеріали І науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. 2021. URL:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2021/paper/view/12128>

(дата звернення: 12.02.2026)

9. Книш Б. П., Бровко П. В. Класифікація безпілотних літальних апаратів. *Матеріали XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. 2018. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzp/all-frtzp-2018/paper/view/4901> (дата звернення: 12.02.2026)

10. Колесник А. В. Характеристики FPV-дронів, особливості їх застосування в бойових діях. *Матеріали IV Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Актуальні проблеми бойового застосування та експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки»*. 2024. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/apozbt/apozbt2024/paper/view/22248> (дата звернення: 12.02.2026)

11. Книш Б. П., Попіль Д. С. Безпілотні літальні апарати. *Матеріали XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. 2018. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzp/all-frtzp-2018/paper/view/4903> (дата звернення: 12.02.2026)

12. Калінович В. О., Кулик Я. А. Класифікація застосування дронів. *Матеріали LII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. 2023. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2023/paper/view/18101> (дата звернення: 12.02.2026)

13. Книш Б. П., Алексєєв М. А. Безпілотні літальні апарати та відеоаналітика. *Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. 2020. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzp/all-frtzp-2020/paper/view/8769> (дата звернення: 12.02.2026)

14. Савченко Ю. О., Никитенко О. Д. Система оптимального управління маршрутами літальних засобів з урахуванням точок приземлення. *Матеріали LIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. 2024. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2024/paper/view/19762> (дата звернення: 12.02.2026).

15. Богомолов С. В., Чуманов А. О. Мікропроцесорні системи безпілотних літальних апаратів. *Матеріали I науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. 2021. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2021/paper/view/12479> (дата звернення: 12.02.2026)
16. Khymych G., Dunets V., Blavitskyi M. Mobilni mali antydronovi systemy. Tekhnolohii proiektuvannia. *Book of Abstracts of the IV International Scientific Conference "Military Conflicts and Technogenic Disasters: Historical and Psychological Consequences"*. 2024. P. 140–144.
17. Чикета В. О. Підвищення точності виявлення і супроводження БПЛА з використанням LIDAR-сенсора : магістерська робота. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025.
18. Sun Z., Wu J., Yen G. G., Lu Z., Yang J. Performance analysis and system implementation for energy-efficient passive UAV radar imaging system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2023. Vol. 72, No 8. P. 9938–9955.
19. Boroujerdian B., Genc H., Krishnan S., Duisterhof B. P., Plancher B., Mansoorshahi K., Reddi V. J. The role of compute in autonomous micro aerial vehicles: optimizing for mission time and energy efficiency. *ACM Transactions on Computer Systems*. 2022. Vol. 39, No 1–4. P. 1–44.
20. Liu X., Xu W., Wang Q., Zhang M. Energy-efficient computing acceleration of unmanned aerial vehicles based on a CPU/FPGA/NPU heterogeneous system. *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. Vol. 11, No 16. P. 27126–27138.
21. Suo J., Zhang X., Shi W., Zhou W. E3-UAV: an edge-based energy-efficient object detection system for unmanned aerial vehicles. *IEEE Internet of Things Journal*. 2023. Vol. 11, No 3. P. 4398–4413.
22. Gupta A., Gupta S. K. A survey on green unmanned aerial vehicles-based fog computing: challenges and future perspective. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2022. Vol. 33, No 11. P. e4603.

23. Liubimov O., Turkin I., Cheranovskiy V., Volobuieva L. UAV mission computer operation mode optimization focusing on computational energy efficiency and system responsiveness. *Computation*. 2024. Vol. 12, No 12. P. 235.
24. Ortega L. D., Loyaga E. S., Cruz P. J., Lema H. P., Abad J., Valencia E. A. Low-cost computer-vision-based embedded systems for UAVs. *Robotics*. 2023. Vol. 12, No 6. P. 145.
25. Wang G., Gu C., Li J., Wang J., Chen X., Zhang H. Heterogeneous flight management system (FMS) design for unmanned aerial vehicles (UAVs): current stages, challenges, and opportunities. *Drones*. 2023. Vol. 7, No 6. P. 380.
26. Chodnicki M., Siemiatkowska B., Stecz W., Stępień S. Energy efficient UAV flight control method in an environment with obstacles and gusts of wind. *Energies*. 2022. Vol. 15, No 10. P. 3730.
27. Osmani K., Schulz D. Comprehensive investigation of unmanned aerial vehicles (UAVs): an in-depth analysis of avionics systems. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No 10. P. 3064.
28. Virgili M., Babu N., Javidsharifi M., Valiulahi I., Masouros C., Forsyth A. J., Papadias C. B. Cost-efficient design of an energy-neutral UAV-based mobile network. *IEEE Transactions on Communications*. 2022. Vol. 70, No 10. P. 6890–6901.
29. Saini H. K., Jain K. A novel deep energy efficient hello packet scheduling for ad hoc networks in unmanned aerial vehicles. *Engineered Science*. 2023. Vol. 22, No 2. P. 843.
30. Ali E., Pora W. VHDL implementation of ARM Cortex-M0 laboratory for graduate engineering students. *Proceedings of the 2020 IEEE Integrated STEM Education Conference*. 2020. P. 69–72. DOI: 10.1109/iSTEM-Ed50324.2020.9332721.
31. Mueller M. M., Diitenberger S., Nestler M., Hese S., Ziemer J., Bachmann F., Leiber J., Dubois C., Thiel C. Novel UAV flight designs for accuracy optimization of structure from motion data products. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. P. 4308.
32. IAMD Centre of Excellence. The evolving UAS threat: lessons from the Russian-Ukrainian war since 2022 on future air defence challenges and requirements. 2024. URL: <https://iamd-coe.org/wp-content/uploads/2024/02/The-Evolving-UAS->

[Threat-Lessons-from-the-Russian-Ukrainian-War-Since-2022-on-Future-Air-Defence-Challenges-and-Requirements.pdf](#) (дата звернення: 21.03.2026).

33. STM32 ARM Cortex M4 Development Board-STM32F407VET6. URL: https://researchdesignlab.com/stm32-arm-cortex-m4-development-board-stm32f407vet6.html?srsltid=AfmBOoqGWPUwpdHSUoOcrN0mfw9_yn3VojGCy9cQ3oo9Xri5_RBAcT3C (дата звернення: 21.03.2026).

34. Raspberry Pi 4 model B WiFi Dual Band Bluetooth 2GB RAM 1.8GHz. URL: <https://botland.store/raspberry-pi-4b-modules-and-kits/14646-raspberry-pi-4-model-b-wifi-dual-band-bluetooth-2gb-ram-18ghz-765756931175.html> (дата звернення: 21.03.2026).

35. Matek Systems GNSS M10Q-5883 U-Blox M10 GPS — з компасом QMC5883L модуль Digital AirSpeed 4–9V для FPV Racing Drone. URL: https://rcdrone.top/uk/products/matek-systems-gnss-m10q-5883-u-blox-m10-gps-uk?srsltid=AfmBOopbHx-rbVb7q-v6Gr8MYnbg8oaxVtlmuEQ_s_xrr1RDenSxMWH (дата звернення: 21.03.2026).

36. Літієво-полімерний акумулятор. URL: <https://risingsunfpv.com/blogs/helpful-guides/lipo-battery-packs-explained?srsltid=AfmBOoo6SZ4WTWSvLiMLfVpjwZ5mXb-ISsA-inA-up3qSGTjykkfSV7> (дата звернення: 21.03.2026).

37. BMS1000 Series Battery Management Systems. URL: <https://www.staflsystems.com/product/bms1000m> (дата звернення: 21.03.2026).

38. 3DR Radio Telemetry 433MHz 500mW(X6). URL: <https://robocraze.com/products/3dr-radio-telemetry-433mhz-500mwx6?srsltid=AfmBOorxgIedAv0DPy3lEHXgaEP7oMUaDmCR5YnJA6PDaaWx5oETskHf> (дата звернення: 21.03.2026).

39. 5.8G 4W FPV VTX + Antenna 48CH 4000W Video Transmitter Built-in Heat Sink + Fan for Long Range FPV Drone. URL: <https://www.amazon.ca/OLurkthu-Antenna-Transmitter-Built-Install/dp/B0D1VHCZ7H> (дата звернення: 21.03.2026).

40. Veyna U., Garcia-Nieto Rodriguez S., Simarro R., Salcedo J. Quadcopters testing platform for educational environments. *Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 4134. DOI: 10.3390/s21124134.
41. Rabiou L., Ahmad A., Gohari A. Advancements of unmanned aerial vehicle technology in the realm of applied sciences and engineering: a review. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2024. Vol. 40. P. 74–95.
42. Telli K., Kraa O., Himeur Y., Ouamane A., Boumehraz M., Atalla S., Mansoor W. A comprehensive review of recent research trends on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Systems*. 2023. Vol. 11. P. 400.
43. Aabid A., Parveez B., Parveen N., Khan S., Raheman M. A., Zayan M., Ahmed O. Reviews on design and development of unmanned aerial vehicle (drone) for different applications. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*. 2022. Vol. 45. P. 53–69.
44. Fortune Business Insights. Unmanned systems/unmanned aerial vehicle (UAV) market. 2024. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/unmanned-aerial-vehicle-uav-market-101603> (дата звернення: 21.03.2026).
45. Owaid S., Miry A., Salman T. Survey on UAV communications: systems, communication technologies, networks, application. *University of Thi-Qar Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 13. P. 136–145.
46. Jiang Y., Xu X. X., Zheng M. Y., Zhan Z. H. Evolutionary computation for unmanned aerial vehicle path planning: a survey. *Artificial Intelligence Review*. 2024. Vol. 57. P. 267.
47. Ahmed F., Jenihhin M. A survey on UAV computing platforms: a hardware reliability perspective. *Sensors*. 2022. Vol. 22. P. 6286.
48. Kumar P., Manoj N., Sudheer N., Bhat P., Arya A., Sharma R. UAV swarm objectives: a critical analysis and comprehensive review. *SN Computer Science*. 2024. Vol. 5. P. 764.

49. Saravanakumar Y. N., Sultan M. T. H., Shahar F. S., Giernacki W., Łukaszewicz A., Nowakowski M., Holovatyy A., Stępień S. Power sources for unmanned aerial vehicles: a state-of-the-art. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. P. 1932.
50. Liubimov O., Turkin I. Optimizing the CubeSat on-board computer power consumption under hard real-time constraints. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering—2023* / ed. by M. Nechyporuk et al. Cham : Springer, 2024. P. 404–414.
51. Liubimov O., Liubimov M. Use of open-source COTS/MOTS hardware and software platforms for the build up of the CubeSat nanosatellites. *Journal of Rocket-Space Technology*. 2023. Vol. 31. P. 138–147.
52. Microchip. COTS-to-radiation-tolerant and radiation-hardened devices. 2019. URL: <https://www.microchip.com/en-us/solutions/aerospace-and-defense/products/microcontrollers-and-microprocessors/cots-to-radiation-tolerant-and-radiation-hardened-devices> (дата звернення: 21.03.2026).
53. Siewert S., Rocha K., Butcher T., Pederson T. Comparison of common instrument stack architectures for small UAS and CubeSats. *Proceedings of the 2021 IEEE Aerospace Conference*. IEEE, 2021. P. 1–17.
54. NASA. State-of-the-art small spacecraft technology: small spacecraft systems virtual institute. URL: <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa> (дата звернення: 21.03.2026).
55. Microchip. ATSAMV71Q21 microprocessor page. 2020. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATSAMV71Q21> (дата звернення: 21.03.2026).
56. Maltezos E., Karagiannidis L., Douklias T., Dadoukis A., Amditis A., Sdongos E. Preliminary design of a multipurpose UAV situational awareness platform based on novel computer vision and machine learning techniques. *Proceedings of SEEDACECNSM 2020*. IEEE, 2020. P. 1–8.
57. Zhu P., Wen L., Du D., Bian X., Fan H., Hu Q., Ling H. Detection and tracking meet drones challenge. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2022. Vol. 44. P. 7380–7399.

58. Cai Y., Zhang E., Qi Y., Lu L. A review of research on the application of deep reinforcement learning in unmanned aerial vehicle resource allocation and trajectory planning. *Proceedings of MLBDBI 2022*. 2022. P. 238–241.
59. Chodnicki M., Siemiatkowska B., Stecz W., Stępień S. Energy efficient UAV flight control method in an environment with obstacles and gusts of wind. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 3730.
60. Kadam S. G., Ruikar S. Designing flight controller of quadcopter using STM32 microcontroller. *International Journal of Innovative Research in Technology*. 2024. Vol. 11, No 3. P. 1163–1168. URL: <https://ijirt.org/article?manuscript=167412>
61. Bocchino R. L. Jr., Canham T. K., Watney G. J., Reder L. J., Levison J. W. F Prime: an open-source framework for small-scale flight software systems. *Proceedings of the 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*. 2018.
62. Liubimov O., Turkin I., Pavlikov V., Volobuyeva L. Agile software development lifecycle and containerization technology for CubeSat command and data handling module implementation. *Computation*. 2023. Vol. 11. P. 182.
63. Choi H., Kim H., Zhu Q. Job-class-level fixed priority scheduling of weakly-hard real-time systems. *Proceedings of RTAS 2019*. IEEE, 2019. P. 241–253.
64. Shi J., Ueter N., Chen J. J., Chen K. H. Average task execution time minimization under (m, k) soft error constraint. *Proceedings of RTAS 2023*. IEEE, 2023.
65. Adam G. K. Timing and performance metrics for TWR-K70F120M device. *Computers*. 2023. Vol. 12. P. 163.
66. RTCA. Aviation system standards and guidance materials. URL: <https://www.rtca.org> (дата звернення: 21.02.2026).
67. Widhalm D., Goeschka K. M., Kastner W. Undervolting on wireless sensor nodes: a critical perspective. *Proceedings of ICDCN '22*. 2022. P. 1–8.
68. Reghenzani F., Guo Z., Fornaciari W. Software fault tolerance in real-time systems: identifying the future research questions. *ACM Computing Surveys*. 2023. Vol. 55. P. 306.
69. Kim B., Yang H. Reliability optimization of real-time satellite embedded system under temperature variations. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 224549–224564.

70. IEC. IEC 61508 Ed. 2.0: functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. IEC, 2021.
71. ISO. ISO 26262-6:2018 Road vehicles – Functional safety – Part 6. ISO, 2018.
72. Zidar J., Matic T., Aleksić I., Hocenski Z. Dynamic voltage and frequency scaling as a method for reducing energy consumption in ultra-low-power embedded systems. *Electronics*. 2024. Vol. 13. P. 826.
73. Oliveira G., Lima G. Scheduling and energy savings for small scale embedded FreeRTOS-based real-time systems. *Design Automation for Embedded Systems*. 2023. Vol. 27. P. 3–29.
74. Musaddiq A., Zikria Y. B., Hahm O., Yu H., Bashir A. K., Kim S. W. A survey on resource management in IoT operating systems. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 8459–8482.
75. FreeRTOS. Low power support: tickless idle mode. URL: <https://www.freertos.org/Documentation/02-Kernel/02-Kernel-features/07-Lower-power-support> (дата звернення: 21.02.2026).
76. Bambagini M., Marinoni M., Aydin H., Buttazzo G. Energy-aware scheduling for real-time systems: a survey. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*. 2016. Vol. 15.
77. de Melo A. C. C. P., Café D. C., Alves Borges R. Assessing power efficiency and performance in nanosatellite onboard computer for control applications. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*. 2020. Vol. 1. P. 110–116.
78. Zoni D., Galimberti A., Fornaciari W. A survey on run-time power monitors at the edge. *ACM Computing Surveys*. 2023. Vol. 55.
79. Kluge F., Rochange C., Ungerer T. EMSBench: benchmark and testbed for reactive real-time systems. *Leibniz Transactions on Embedded Systems*. 2017. Vol. 4. P. 02:1–02:23.
80. Dobija K. Countering unmanned aerial systems (UAS) in military operations. *Safety & Defense*. 2023. Vol. 9. P. 74–82.

81. Microchip Technology Inc. Microcontrollers and microprocessors documentation. URL: <https://www.microchip.com> (дата звернення: 21.02.2026).
82. Raspberry Pi Foundation. RP2040 microcontroller documentation. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/rp2040> (дата звернення: 21.02.2026).
83. PX4 Autopilot. PX4 user guide & developer documentation. URL: <https://docs.px4.io> (дата звернення: 21.02.2026).
84. ArduPilot. ArduPilot documentation. URL: <https://ardupilot.org> (дата звернення: 21.02.2026).
85. Dronecode Foundation. Open-source drone software ecosystem. URL: <https://dronecode.org> (дата звернення: 21.02.2026).
86. ARM Ltd. ARM developer documentation. URL: <https://developer.arm.com> (дата звернення: 21.02.2026).
87. RISC-V International. RISC-V technical specifications and documentation. URL: <https://riscv.org> (дата звернення: 21.02.2026).
88. STMicroelectronics. STM32 microcontroller documentation and application notes. URL: <https://www.st.com> (дата звернення: 21.02.2026).
89. Басюк О. О., Лигун О. О. Енергоефективна бортова комп'ютерна система для малих безпілотних літальних апаратів. *Матеріали XIX Всеукраїнської науково-практичної WEB-конференції аспірантів, студентів та молодих вчених, 25–27 березня 2026 р. Кривий Ріг : Криворізький національний університет, 2026. С. 286–288.*
90. FreeRTOS. URL: <https://www.freertos.org/> (дата звернення: 11.04.2026).
91. land-classification Computer Vision Model. URL: <https://universe.roboflow.com/national-university-of-singapore-odcprk/land-classification-vrgfx> (дата звернення: 11.04.2026).

ДОДАТОК А (обов'язковий)

Публікація

*Басюк О. О., Лигун О.О.
Хмельницький національний університет*

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА БОРТОВА КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ДЛЯ МАЛИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Розглянуто проблему забезпечення енергоефективності бортових комп'ютерних систем малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Запропоновано концепцію побудови бортової комп'ютерної системи на основі гетерогенної архітектури з розподілом функцій між контуром реального часу та високорівневим обчислювальним модулем. Описано структурну модель системи та формалізовані показники оцінки енергоефективності.

Малі БПЛА характеризуються обмеженим енергетичним ресурсом, що безпосередньо впливає на тривалість місії та функціональні можливості системи. Зростання обчислювальної складності алгоритмів автономної навігації та комп'ютерного зору потребує підвищення продуктивності бортових систем, що може призводити до збільшення енергоспоживання. Як зазначають Вогоуґердіан та ін. [1], оптимізація обчислювальних ресурсів є критичним чинником продовження часу місії автономних мікро-БПЛА. Ahmed та Jenihhin [2] підкреслюють важливість апаратної надійності та вибору відповідної обчислювальної платформи для авіоніки БПЛА. Chodnicki та ін. [3] демонструють, що енергоефективні алгоритми керування польотом можуть суттєво зменшити загальне споживання енергії системою. У даній роботі запропоновано дворівневу гетерогенну архітектуру:

Рівень 1 – Контур реального часу. Низькопотужний мікроконтролер (ARM Cortex-M або RISC-V) виконує задачі стабілізації, обробки IMU-даних, керування двигунами.

Рівень 2 – Високопродуктивний модуль. SoC або одноплатний комп'ютер виконує задачі комп'ютерного зору, планування маршруту, аналізу місії.

Для кількісної оцінки ефективності архітектури вводяться показники продуктивності або потужності, який описується за формулою 1.

$$\eta = \frac{P_{comp}}{P_{power}}, \quad (1)$$

де:

P_{comp} – обчислювальна продуктивність (операції/с або FPS),
 P_{power} – споживана потужність (Вт).

Максимізація η забезпечує підвищення ефективності використання енергії.
 Енергія на виконання місії обчислюється за формулою 2.

$$E_{mission} = \int_0^T P(t) dt, \quad (2)$$

де:

$P(t)$ – миттєва споживана потужність,

T – тривалість польоту.

Зменшення $E_{mission}$ дозволяє збільшити тривалість автономної роботи. Питома енергія на обробку кадру обчислюється за формулою 3.

$$E_{frame} = \frac{P_{avg}}{FPS}, \quad (3)$$

де:

P_{avg} – середня потужність системи,

FPS – кількість оброблених кадрів за секунду.

Цей показник є критичним для систем комп'ютерного зору на борту БПЛА. Отже, метод забезпечення енергоефективності бортових комп'ютерних систем для малих БПЛА складається з наступних кроків:

1. Функціональний розподіл задач між рівнями.
2. Використання DVFS (Dynamic Voltage and Frequency Scaling).
3. Адаптивна активація обчислювальних модулів залежно від фази місії.
4. Використання RTOS із пріоритетним плануванням.

У ході дослідження було проведено експериментальне дослідження різних видів архітектур. У таблиці 1 наведено результати експериментального порівняння архітектур бортових обчислювальних систем БПЛА.

Таблиця 1 - Результати експериментального порівняння архітектур бортових обчислювальних систем БПЛА

Архітектура системи	Обчислювальна платформа	Споживана потужність, Вт	Продуктивність (FPS)	Показник ефективності η (FPS/Вт)	Орієнтовний час роботи від батареї, хв
Однорівнева MCU	STM32F4 (Cortex-M4)	1.8	8	4.4	32
Однорівнева SBC	Raspberry Pi 4	6.5	28	4.3	18
Гетерогенна архітектура	MCU + Raspberry Pi	4.2	30	7.1	26

Гетерогенна з керуванням енергоспоживанням	MCU + SoC + DVFS	3.4	30	8.8	31
--	------------------	-----	----	-----	----

Результати експерименту показують, що використання гетерогенної архітектури бортової комп'ютерної системи дозволяє підвищити енергоефективність обчислень у порівнянні з однорівневими архітектурами. Найкращі результати отримано при застосуванні механізмів адаптивного керування енергоспоживанням, що дозволило зменшити споживану потужність приблизно на 19% при збереженні обчислювальної продуктивності. Це сприяє збільшенню тривалості польоту малого БПЛА та більш ефективному використанню енергетичних ресурсів. Запропонований підхід дозволяє досягти балансу між продуктивністю, стабільністю реального часу та мінімізацією енергоспоживання. Архітектура є масштабованою та може адаптуватися до різних класів малих БПЛА.

Подальші дослідження спрямовані на експериментальне вимірювання показників η , $E_{mission}$ та E_{frame} для різних апаратних конфігурацій.

Перелік посилань:

1. Boroujerdian, B., Genc, H., Krishnan, S., Duisterhof, B. P., Plancher, B., Mansoorshahi, K., & Reddi, V. J. (2022). The role of computers in autonomous micro aerial vehicles: Optimizing for mission time and energy efficiency. *ACM Transactions on Computer Systems*, 39(1–4), 1–44.
2. Ahmed, F., & Jenihhin, M. (2022). A survey on UAV computing platforms: A hardware reliability perspective. *Sensors*, 22, 6286.
3. Chodnicki, M., Siemiatkowska, B., Stecz, W., & Stępień, S. (2022). Energy efficient UAV flight control method in an environment with obstacles and gusts of wind. *Energies*, 15, 3730.

ДОДАТОК Б (обов'язковий)

Презентація

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем



Бортова комп'ютерна система для малих безпілотних літальних апаратів на основі енергоефективної архітектури

Здобувач: Басюк Олександр Олександрович

Науковий керівник: к.е.н., доцент, Саченко Світлана Іванівна

Хмельницький - 2026

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є розробити енергоефективну бортову комп'ютерну систему для малих безпілотних літальних апаратів із підтримкою алгоритмів реального часу та модуля комп'ютерного зору на базі архітектури YOLO для автоматичного виявлення об'єктів.

Об'єктом дослідження є бортові комп'ютерні системи малих безпілотних літальних апаратів.

Предметом дослідження є методи та засоби побудови енергоефективної архітектури бортової комп'ютерної системи, алгоритми обробки сенсорних даних, стабілізації польоту та реалізації комп'ютерного зору у вбудованих системах БПЛА.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основні задачі роботи:

- Проаналізувати особливості малих БПЛА, сучасні бортові комп'ютерні системи та вимоги до їх енергоефективності.
- Обґрунтувати вибір апаратної платформи та розробити структуру енергоефективної бортової комп'ютерної системи.
- Розробити програмну архітектуру системи, алгоритми збору й фільтрації сенсорних даних та стабілізації польоту.
- Реалізувати модуль комп'ютерного зору на основі архітектури YOLO для виявлення людей і транспортних засобів.
- Провести експериментальну апробацію запропонованих рішень та оцінити ефективність системи за показниками точності, продуктивності й енергоспоживання.

НАУКОВА НОВИЗНА ТА ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Наукова новизна отриманих результатів:

- набув подальшого розвитку підхід до побудови енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА на основі інтеграції модулів керування польотом, сенсорної обробки та комп'ютерного зору, який, на відміну від існуючих рішень, поєднує алгоритми детекції об'єктів на базі YOLO із механізмами енергоменеджменту та обробки даних у режимі реального часу;
- удосконалено архітектуру програмно-апаратної взаємодії компонентів бортової системи шляхом розподілу функцій між сенсорною підсистемою, обчислювальними модулями та підсистемою енергозбереження, що дозволило підвищити ефективність використання обчислювальних ресурсів і зменшити енергоспоживання;

Практична цінність отриманих результатів полягає у розробленні енергоефективної бортової комп'ютерної системи малого БПЛА з інтегрованим модулем комп'ютерного зору, яка може бути використана як основа для створення автономних безпілотних платформ, систем моніторингу, відеоаналітики, навігації та ситуаційної обізнаності в задачах цивільного й спеціального призначення. .

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

- ❑ малі БПЛА мають обмежений енергетичний ресурс;
- ❑ сучасні задачі БПЛА потребують обробки даних у реальному часі;
- ❑ алгоритми комп'ютерного зору збільшують обчислювальне навантаження;
- ❑ існує потреба у зменшенні енергоспоживання бортових систем;
- ❑ необхідно забезпечити баланс між продуктивністю, автономністю та надійністю; енергоефективна архітектура дозволяє збільшити тривалість польоту та функціональні можливості БПЛА.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ



Мультикоптери



Малі БПЛА літакового типу



Гібридні БПЛА типу VTOL

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Параметр	Мультикоптер	Літаковий тип	VTOL
Енергоефективність	Низька–середня	Висока	Середня–висока
Час польоту	15–40 хв	1–4 год	1–3 год
Складність БКС	Середня	Висока	Висока
Вимоги до RTOS	Обов'язкові	Обов'язкові	Критично важливі
Обчислювальне навантаження	Стабілізація, навігація	Навігація, автопілот	Перехідні режими + стабілізація
Параметр	Мультикоптер	Літаковий тип	VTOL

АХІТЕКТУРА МАЛОГО БПЛА

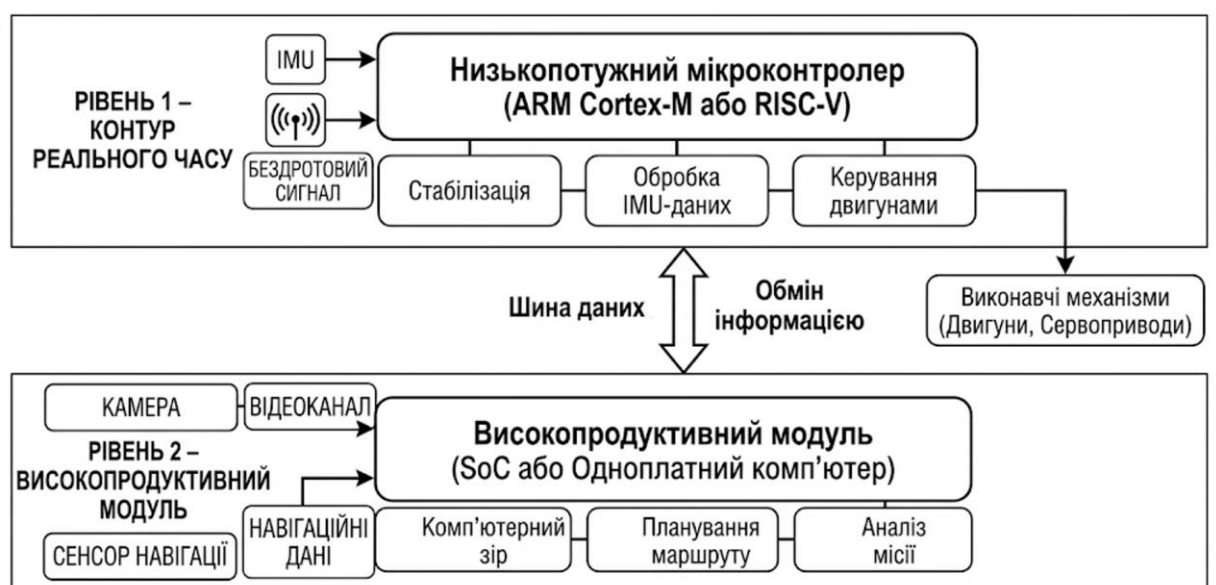
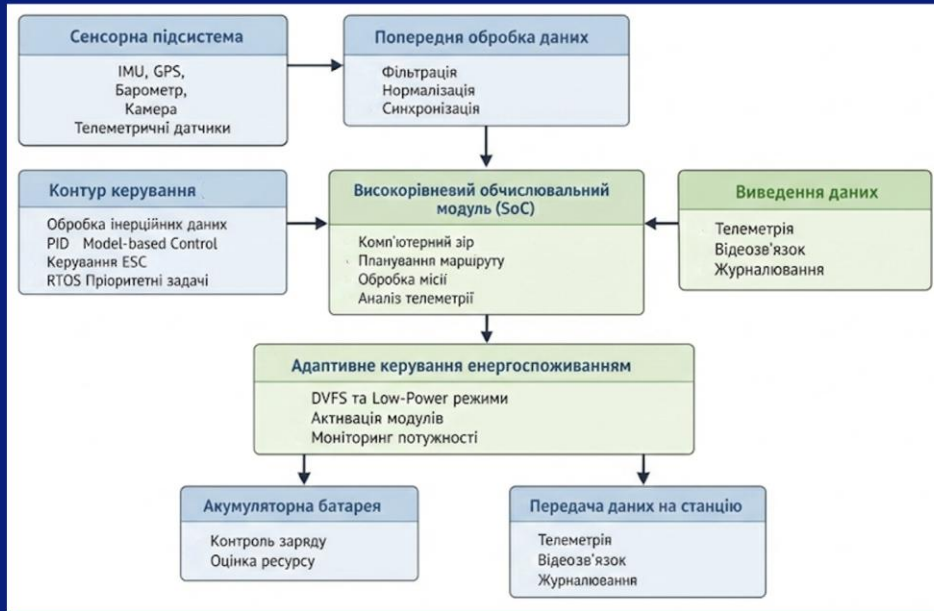
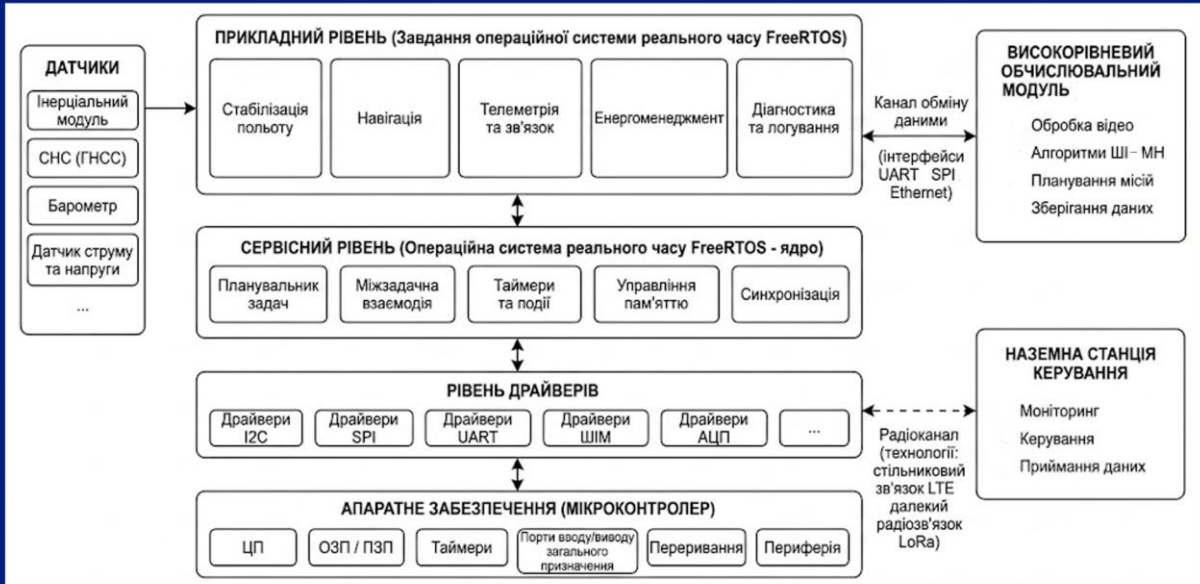


СХЕМА ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ КОМПОНЕНТАМИ БОРТОВОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ МАЛОГО БПЛА



РОЗШИРЕНА СХЕМА АРХІТЕКТУРИ БОРТОВОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ МАЛОГО БПЛА



РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ВИБІР АРХІТЕКТУРИ

Для кількісної оцінки ефективності архітектури введемо показники продуктивності або потужності, який описується за формулою 2.1.

$$\eta = \frac{P_{comp}}{P_{power}}, \quad (2.1)$$

де:

P_{comp} – обчислювальна продуктивність (операції/с або FPS),

P_{power} – споживана потужність (Вт).

Максимізація η забезпечує підвищення ефективності використання енергії.

Енергія на виконання місії обчислюється за формулою 2.2.

$$E_{mission} = \int_0^T P(t) dt, \quad (2.2)$$

де:

$P(t)$ – миттєва споживана потужність,

T – тривалість польоту.

Зменшення $E_{mission}$ дозволяє збільшити тривалість автономної роботи.

Питома енергія на обробку кадру обчислюється за формулою 2.3.

$$E_{frame} = \frac{P_{avg}}{FPS}, \quad (2.3)$$

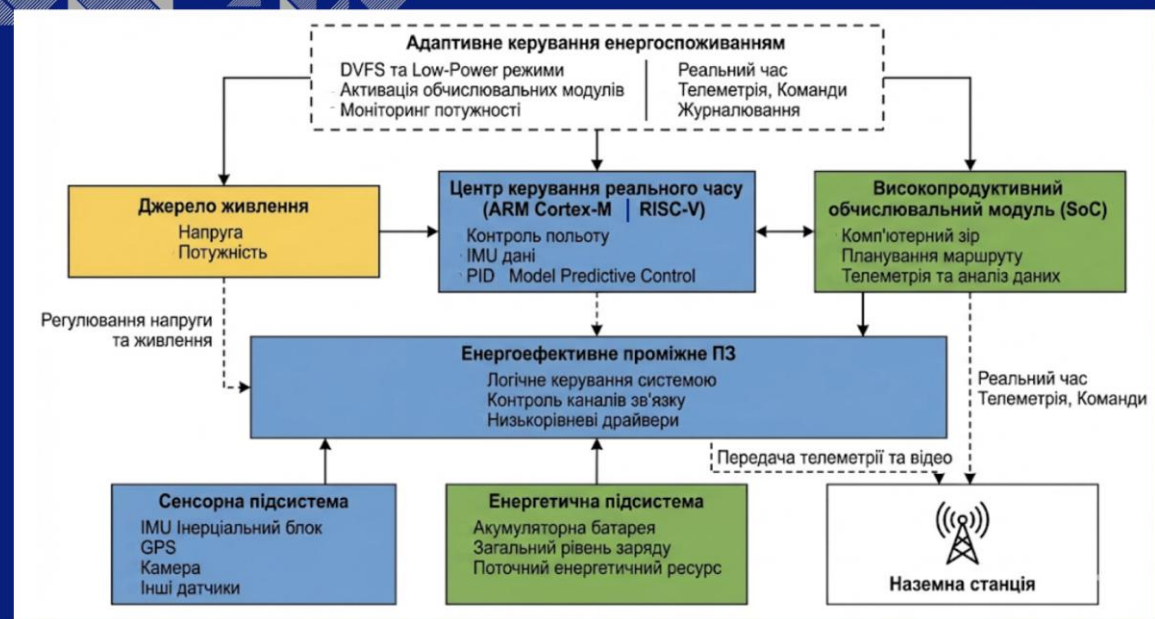
де:

P_{avg} – середня потужність системи,

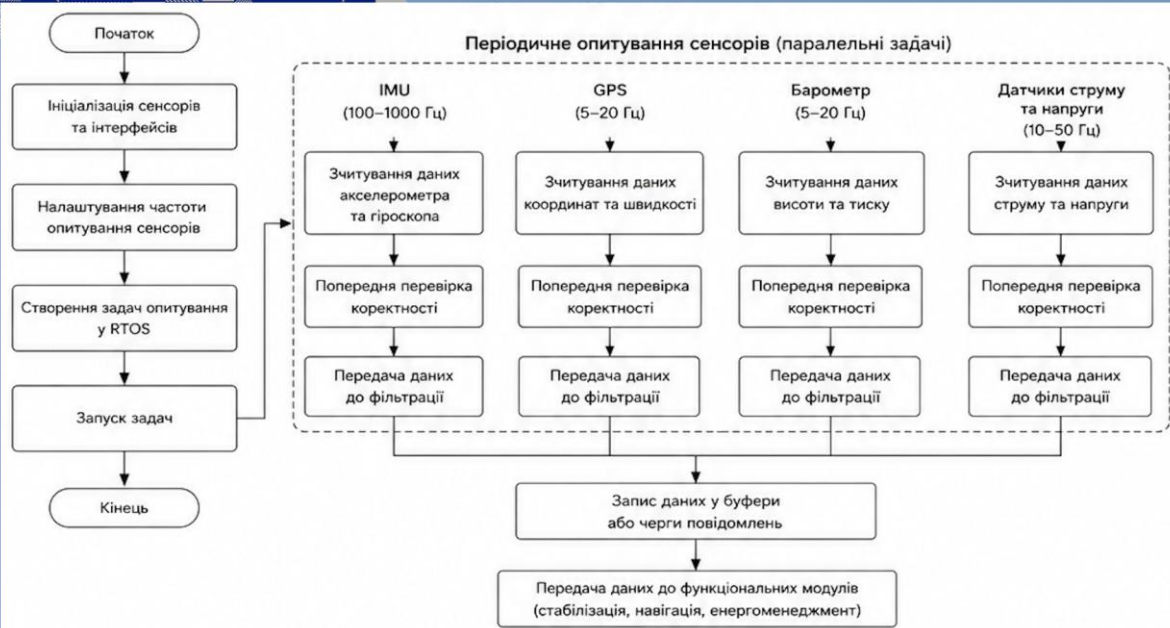
FPS – кількість оброблених кадрів за секунду.

Критерій	Мікроконтролер (MCU, ARM Cortex-M)	Одноплатний комп'ютер (SBC)	Гетерогенна система (MCU + SoC)
Енергоспоживання	Низьке (0.5–3 Вт)	Високе (5–10 Вт)	Середнє (3–6 Вт, адаптивне)
Продуктивність	Низька–середня	Висока	Висока (розподілена)
Реальний час	Повна підтримка	Обмежена	через MCU
Периферійні інтерфейси	Широка підтримка (SPI, I2C, UART, PWM)	менш детерміновано	Максимальна
Обробка відео	Немає	Підтримується	Ефективно (на SoC)
Масштабованість	Обмежена	Середня	Висока
Складність реалізації	Низька	Середня	Вища
Надійність	Висока	Середня	Висока
Програмна підтримка	RTOS/ bare-metal	Linux/ ROS	RTOS + Linux
Енергоефективність (продуктивність/Вт)	Середня	Низька	Висока

СТРУКТУРНА СХЕМА КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ МАЛОГО БПЛА



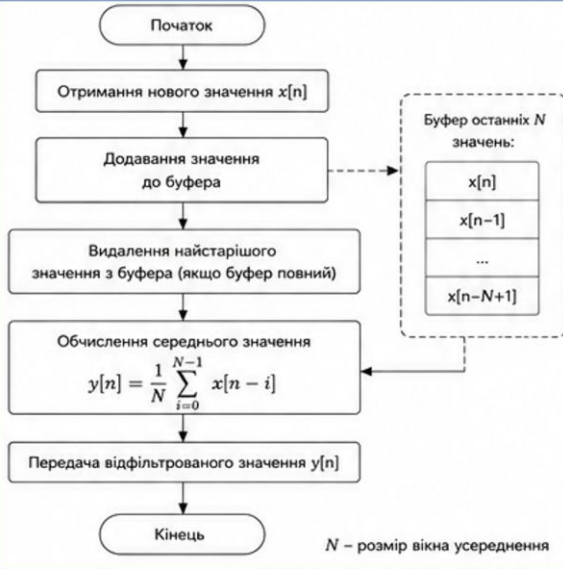
АЛГОРИТМ ЗБОРУ СЕНСОРНИХ ДАНИХ БОРТОВОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ МАЛОГО БПЛА



АЛГОРИТМИ ФІЛЬТРАЦІЇ



Алгоритм комплементарного фільтра

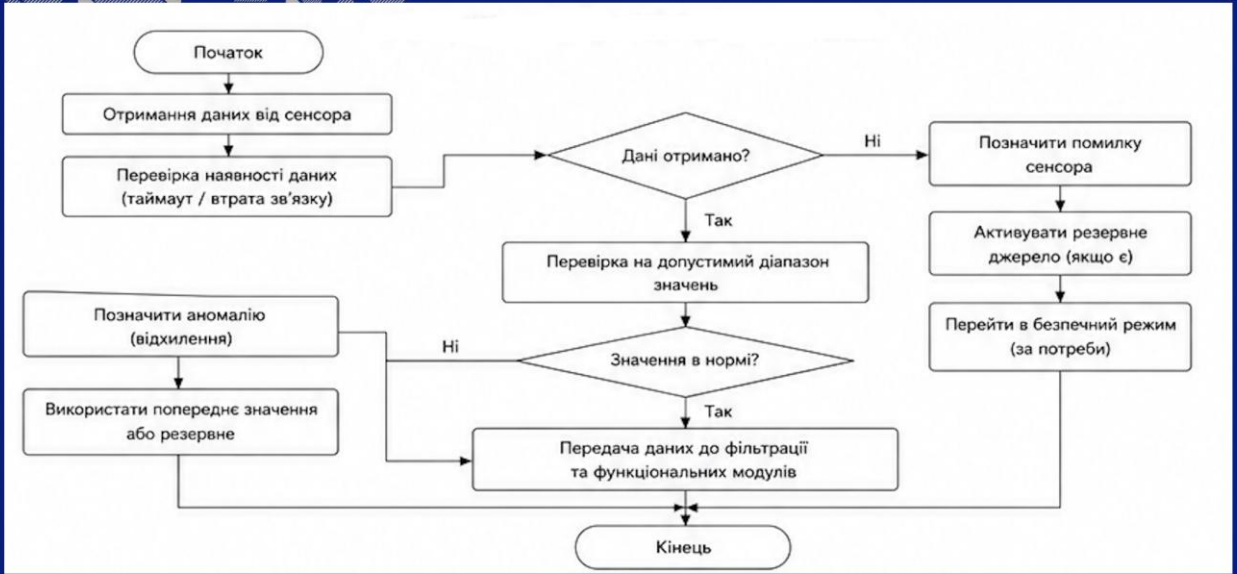


N – розмір вікна усереднення

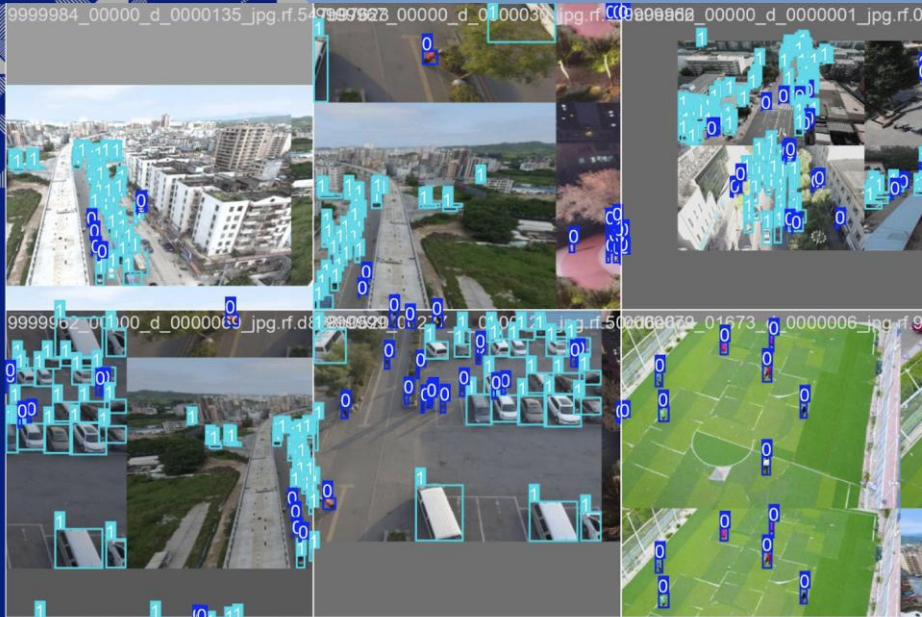
Алгоритм фільтрації ковзним середнім

Позначення:
 θ_{prev} – попереднє значення кута
 ω – кутова швидкість (гіроскоп)
 θ_{acc} – оцінка кута за акселерометром
 Δt – часовий інтервал
 α – коефіцієнт фільтрації (0...1)

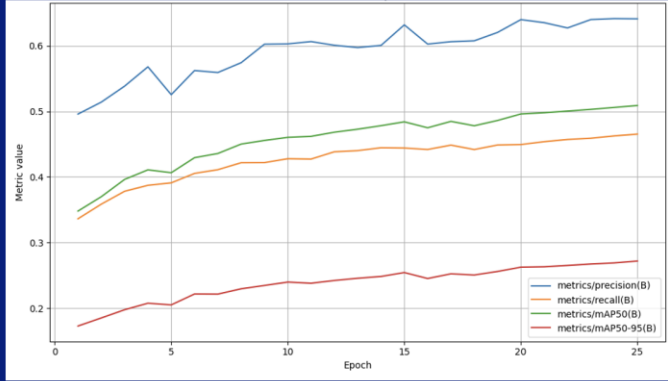
АЛГОРИТМ ПЕРЕВІРКИ ДОСТОВІРНОСТІ ДАНИХ



ЕКСПЕРИМЕНТИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

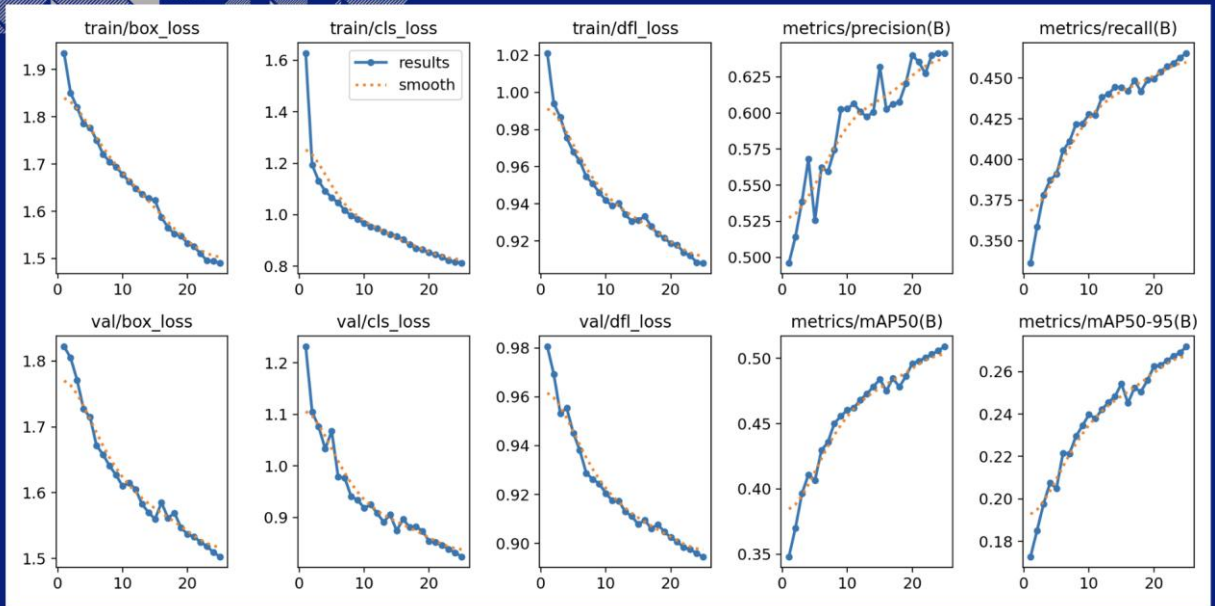


ЕКСПЕРИМЕНТИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ



Показник	1-ша епоха	25-та епоха	Зміна
train/box_loss	1.93495	1.49015	-22.99%
train/cls_loss	1.62821	0.81199	-50.13%
train/df_l_loss	1.02118	0.90807	-11.08%
val/box_loss	1.82215	1.50259	-17.54%
val/cls_loss	1.23164	0.82388	-33.11%
val/df_l_loss	0.98053	0.89454	-8.77%
Precision	0.49595	0.64121	+29.29%
Recall	0.33627	0.46541	+38.40%
mAP50	0.34802	0.50903	+46.26%
mAP50-95	0.17273	0.27182	+57.37%

ЕКСПЕРИМЕНТИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ



ЕКСПЕРИМЕНТИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ



ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу розроблення бортової комп'ютерної системи для малих безпілотних літальних апаратів на основі енергоефективної архітектури. Актуальність роботи обумовлена стрімким розвитком безпілотних технологій та необхідністю створення компактних, продуктивних і енергоефективних embedded-систем, здатних забезпечувати автономне функціонування БПЛА в умовах обмежених обчислювальних і енергетичних ресурсів.

У процесі виконання роботи було проведено аналіз особливостей малих БПЛА, сучасних архітектур бортових комп'ютерних систем та підходів до забезпечення енергоефективності embedded-платформ. Розглянуто сучасні мікропроцесорні архітектури ARM, RISC-V та SoC, виконано їх порівняльний аналіз за критеріями продуктивності, енергоспоживання та придатності до використання у складі бортових систем реального часу. На основі проведеного аналізу обґрунтовано вибір енергоефективної апаратної платформи для реалізації бортової комп'ютерної системи малого БПЛА.


У роботі розроблено структурну архітектуру бортової комп'ютерної системи, що включає модулі керування польотом, збору та обробки сенсорної інформації, енергоменеджменту, телеметрії та комп'ютерного зору. Запропонована архітектура забезпечує модульність, масштабованість та можливість інтеграції сучасних алгоритмів штучного інтелекту в системах реального часу.

Було розроблено програмну архітектуру системи із застосуванням підходів RTOS та елементів багатозадачної обробки даних. Реалізовано алгоритми збору, фільтрації та перевірки достовірності сенсорних даних, а також алгоритми стабілізації та керування польотом. Особливу увагу приділено методам оптимізації енергоспоживання на програмному рівні, зокрема використанню режимів енергозбереження, оптимізації частоти опитування сенсорів та раціонального розподілу обчислювальних ресурсів.

Практичною частиною роботи стала реалізація модуля комп'ютерного зору на базі нейромережевої архітектури YOLO11n для автоматичного виявлення людей та транспортних засобів на аерофотозображеннях. Проведено навчання та тестування моделі на спеціалізованому наборі даних, а також виконано аналіз основних метрик якості роботи системи. За результатами експериментів отримано значення mAP@0.5 близько 0.51, що підтверджує працездатність моделі в умовах використання на енергоефективних embedded-платформах.

Проведений аналіз результатів показав, що запропонована система забезпечує прийнятний рівень точності виявлення об'єктів при помірному обчислювальному навантаженні та низькому енергоспоживанні. Найкращі результати отримано для виявлення транспортних засобів, тоді як задачі детекції людей потребують подальшого вдосконалення шляхом розширення навчальної вибірки та оптимізації архітектури нейронної мережі.

ПУБЛІКАЦІЯ



Басюк О.О., Лигун О.О., Енергоефективна бортова комп'ютерна система для малих безпілотних літальних апаратів. Матеріали XIX Всеукраїнської науково практичної WEB конференції аспірантів, студентів та молодих вчених (25-27 березня 2026 р.). – Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2026. ст.286-288.

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Бортова комп'ютерна система для малих безпілотних літальних апаратів на основі енергоефективної архітектури

Автор Олександр БАСЮК

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: к.е.н., доцент Світлана САЧЕНКО

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 7,13%; та системою Anti-Plagiarism складає 25% що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

18.05.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Підпис


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олег САВЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Світлана САЧЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Олександр Басюк

Тема: Бортова комп'ютерна система для малих безпілотних літальних апаратів на основі енергоефективної архітектури

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень ____; кількість сторінок записки 80

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень. У роботі розглянуто актуальну задачу розроблення енергоефективної бортової комп'ютерної системи для малих безпілотних літальних апаратів.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню _____
Кваліфікаційна робота магістра відповідає виданому завданню _____

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналіз особливостей малих БПЛА, сучасних бортових комп'ютерних систем, embedded-платформ та методів забезпечення енергоефективності. Розглянуто сучасні мікропроцесорні архітектури ARM, RISC-V та SoC. У другому розділі розроблено структурну архітектуру бортової комп'ютерної системи, обгрунтовано вибір апаратної платформи, сенсорної підсистеми та засобів енергоменеджменту. Розглянуто питання резервування та забезпечення відмовостійкості системи.

У третьому розділі реалізовано програмну архітектуру системи, алгоритми збору та фільтрації сенсорних даних, стабілізації польоту та оптимізації енергоспоживання на програмному рівні. Для організації задач реального часу використано RTOS-підхід.

У четвертому розділі реалізовано та досліджено модуль комп'ютерного зору на базі архітектури YOLO11n. Проведено навчання моделі, аналіз метрик якості та

експериментальну апробацію системи в задачах виявлення людей і транспортних засобів на аерофотозображеннях.

4. Позитивні сторони роботи: Робота присвячена актуальній проблемі створення енергоефективних бортових систем для сучасних малих БПЛА. Позитивною стороною роботи є комплексний підхід до розроблення системи, який поєднує апаратну та програмну архітектури, алгоритми керування польотом і методи комп'ютерного зору.

5. Негативні сторони роботи: У роботі недостатньо детально розглянуто питання оптимізації нейромережових алгоритмів для роботи в умовах складних погодних умов та низької освітленості. Також потребують подальшого дослідження питання підвищення точності детекції малорозмірних об'єктів та оптимізації енергоспоживання високорівневих обчислювальних модулів.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: —

7. Відгук про роботу в цілому: В загальному робота виконана на достатньому науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: —

9. Оцінка кваліфікаційної роботи магістра:

Згод. / 2 / 22

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) —

Бєлоусова Леоніда Леонівна, Здобувач 193, ХХХ

"15" 05 2026р.



Зав. кафедри КПС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Олександра БАСЮКА

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2м-24-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

1 травня 2026 року



Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Олександр БАСЮК

Співавтор:

Назва: Бортова комп'ютерна система для малих безпілотних літальних апаратів на основі енергоефективної архітектури

Експерт: Світлана САЧЕНКО

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 7.13%

Коефіцієнт подібності 2: 2.4%

Мікропробіли: 25

Заміна букв: 6

Інтервали: 0

Білі знаки: 6

Дата створення звіту: 2026-05-18 18:15:56.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-05-18

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

Максимальне співпадіння з одним документом 25.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 15%

ID: 271648 Назва: МКР Бортова комп'ютерна система для малих безпілотних літальних апаратів на основі енергоефективної архітектури Додано в БД: 2026-05-18 Автора: Олександр БАСЮК Керівники: Світлана САЧЕНКО Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	113725	908	30111 (26%)	262 (29%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
269817	Назва: Звіт з ПДП Бортова комп'ютерна система для малих безпілотних літальних апаратів на основі енергоефективної архітектури Додано в БД: 2026-03-16 Автора: О.О. Басюка Керівники: О.О. Павлова Консультанти: Опоненти:	27879 (25.0%)	231 (25.0%)