

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет  
«Харківський авіаційний інститут»

Кафедра мехатроніки та електротехніки

**Лабораторна робота 1**

з дисципліни **«Мехатронні системи»**  
(назва дисципліни)

**На тему: Розробити бюджетний підвіс для індустріального  
обстеження будівель на предмет тепловтрат**

Здобувача освіти 359 групи

Ліпницької Д.В.

(прізвище та ініціали студента)

Прийняв: доцент, к.т.н., доцент

Кочук С.Б.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

## **План**

### **1. Основна мета:**

- виконувати інспекцію будівель на наявність тепловтрат;
- забезпечувати стабільність зображення під час польоту дрона;
- отримувати якісні відео/фото як з RGB, так і з тепловізійної камери.

### **2. Базові вимоги до підвісу:**

- двоступенева стабілізація (по двох осях: pitch, roll);
- сумісність із двома типами камер (RGB + тепловізор);
- можливість переключати сигнали від різних камер;
- невелика вага (щоб не зменшити час польоту дрона);
- бюджетність (мінімізація вартості без втрати якості).

### **3. Вимоги до керування:**

- плата керування підвісом повинна підтримувати **SBus** та **UART** інтерфейси;
- потрібна сумісність із польотним контролером, який може мікшувати два AV-сигнали.

### **4. Умови застосування:**

- обстеження будівель у міських умовах;
- робота при різних температурах та рівнях освітлення;
- відсутність критичних вібрацій і розмиття зображення.

## 1. ОЧІКУВАНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ КАМЕРІ

**Мета:** отримувати інформативні термальні знімки/карти для виявлення тепловтрат на фасадах і дахах з висоти 30–100 м.

### Ключові параметри

#### 1) Роздільна здатність матриці (IR):

- Мінімум: **320 × 240 px** — прийнятно для загальної інспекції.
- Рекомендовано: **640 × 512 px** — комфортна роздільна здатність для локалізації витоків.
- Ідеал: **>640 × 512 px** або SuperRes-режим.

**Чому:** вища роздільна здатність дає кращу детекцію дрібних дефектів на висоті.

#### 2) NETD (теплова чутливість):

- Мінімум: **< 100 mK (0.1 °C)**.
- Рекомендовано: **≤ 50 mK (0.05 °C)**.
- Ідеал: **≤ 30 mK**.

**Чому:** нижчий NETD дозволяє розрізняти малі перепади температури, важливо для тепловтрат.

### **3) Радіометричність (ability to output temperature values):**

- Обов'язково в ідеалі — **радіометрична** (з можливістю калібрування).
- Мінімум — можливість експортувати термальні кадри для постобробки.

**Чому:** для точних вимірювань і звітів потрібні температурні значення пікселів.

### **4) Оптика / FOV (Field of View) і фокус:**

- Типово:  $\text{FOV} \approx 25\text{--}45^\circ$  для балансу покриття/деталі.
- Оптичний zoom — бажано (перевага для фасадних інспектій).
- Можливість зміни лінз/фокусування (мін./макс. фокусні відстані).

**Чому:** FOV визначає, якого масштабу область бачить камера з певної висоти.

### **5) Формат виводу та інтерфейси:**

- Відео (RTSP/HDMI/RAW) і/або серійний (UART) для telemetriy.
- Підтримка **PWM** для тригера/синхронізації, або API для trigger.
- Підтримка логування на SD або стрімінг на назем. При найменні **UART/USB** для скачування даних.

### **6) Вага та габарити:**

- Рекомендовано:  $\leq 700$  г (щоб вписуватись у цільовий payload).
- Іdeal (OEM модуль): значно менше — 30–200 г, плюс корпус.

## **7) Параметри живлення:**

- Напруга: **5–24 V** (вказати у специфікації), енергоспоживання ~ залежить від модуля.
- Наявність вбудованого стабілізатора — плюс.

## **8) Діапазон робочих температур:**

- Мінімум: **−10...+50 °C**.
- Бажано: **−20...+60 °C** — для польових умов.

## **9) Додаткові опції:**

- Вбудований RGB (dual-sensor) — великий плюс.
- GPS/TimeStamp синхронізація кадрів.
- SDK / API для автоматизації обробки.

## **Критерії приймання камери**

- Роздільна здатність  $\geq$  обраного рівня і NETD  $\leq$  заявленого рівня;
- Камера успішно віддає кадри/дані через обраний інтерфейс (UART/PWM/USB);
- Вага та габарити вкладаються в обмеження підвісу;
- Можливість отримувати радіометричні дані (або експортувати термальні кадри).

## 2. ГІМБАЛ / ПІДВІС — МЕХАНІКА ТА ДВИГУНИ

**Мета:** стабілізація камери по двох осях (tilt + pan або tilt + roll), мінімальні вібрації, керування через плату з SBus/UART.

### Механічні параметри

- 1) **Тип:** 2-осьовий brushless gimbal (hollow-shaft бажано для пропуску кабелів).
- 2) **Матеріали:** легкий алюміній (6061) або магній/карбон — для структурної жорсткості і мінімальної ваги.
- 3) **Вага власного вузла:** ціль  $\leq 800$  г (без камери).
- 4) **Коефіцієнт запасу по payload:** мінімум 1.5x від маси камери; краще — 2x (тобто, якщо камера 600 г  $\rightarrow$  підвіс розраховувати на  $\geq 900\text{--}1200$  г робочого навантаження).

### 2.1. Параметри для вибору двигуна

#### 1) Розмір та тип:

- Таймінг: спеціалізовані gimbal brushless motors (серія 28–54 мм залежить від потреб).
- Hollow shaft — бажано.

#### 2) Крутний момент (torque):

- Розрахунок: необхідний torque залежить від відстані від осі до СМ та маси камери. Як правило, для payload  $\sim 600$  г потрібні мікро-до-міні мотори з номінальним крутним моментом, достатнім для тримання  $\pm$  рухів; практично — орієнтир у характеристиках виробника.

### **3) Струм (робочий / пік):**

- Мотор має витримувати пікові струми при різких маневрах; плата керування повинна мати запас  $\geq 1.5\text{--}2x$  від середнього робочого струму мотора.

### **4) Cogging & Vibration:** мотор повинен мати низький cogging (без роликів), щоб уникнути деренчання в статичному режимі.

## **Механічні вимоги до кріплень**

- Жорсткі кронштейни з можливістю точно виставити центр мас;
- Антивібраційні демпфери між підвісом і рамою (soft mounts) — робочий хід  $\sim 5\text{--}10$  mm;
- Монтажні отвори узгоджені зі стандартом платформи коптера (або адаптери).

## **Критерії приймання механіки/моторів**

- Підвіс витримує статичне навантаження (payload +  $\pm$  запас) без деформації;
- Балансування: центр мас вирівняний, статичний кут  $\leq 5^\circ$ ;
- Підвіс забезпечує стабільність при симуляції вітру (на землі або під час польоту) відповідно до вимог кутової точності.

### **3. ПЛАТА КЕРУВАННЯ ГІМБАЛОМ ТА ПОЛЬОТНИЙ КОНТРОЛЕР**

**Мета:** плавне та надійне керування осями підвісу, зв'язок з польотним контролером, підтримка SBUS та UART, запас по струму.

#### **3.1. Плата керування гімбалом (Gimbal controller)**

##### **Обов'язкові функції:**

- Підтримка **UART** (Serial) для телеметрії/команд і налаштувань.
- Підтримка **SBus** (або сумісного) — щоб отримувати команди від пульта через приймач.
- Підтримка **PWM** входів/виходів для тригеру камер.
- Підтримка PID/advanced tuning (налаштування стабілізації).
- Точність позиціонування (sampling rate)  $\geq 100\text{--}400 \text{ Hz}$  (частота опитування IMU/керування).
- Вбудований драйвер моторів або виходи для зовнішніх ESC (залежить від архітектури).
- Захист від перевантаження і температурне відключення.

##### **Параметри струму:**

- Плата повинна витримувати струми для моторів з запасом **1.5–2x**; наприклад, якщо мотори пік-струм 5 A → плата повинна мати 8–10 A запасу.

##### **Телеметрія та API:**

- Серіальний протокол для зв'язку з FC (MAVLink опціонально, або простий serial протокол SimpleBGC).

- Логи роботи та можливість оновлення прошивки.

### **3.2. Польотний контролер (Flight Controller)**

#### **Функції:**

- Підтримка **MAVLink** (опціонально) / UART комунікації з гімбалом.
- Виходи для PWM/SBus (для приймача та тригерів).
- Можливість керувати подачею AV сигналів (mixing) — тобто перемикати на ground-station/recorder два AV входи не одночасно. Це може бути реалізовано через зовнішній відеосвіч або контролер відео, але польотний контролер має забезпечувати тригер/команди.
- Стабільність та безпека: failsafe, контролі напруги.

#### **Інтеграція с гімбалом:**

- FC має надсилати команди позиціонування гімбалу або simple mode (передача утримання камери), та тригерити камеру (PWM trigger).

#### **Критерії приймання електроніки**

- Плата гімбалу приймає та виконує команди via UART/SBus;
- Плата не перегрівається при тестовому навантаженні;
- При симуляції пікових рухів струм не перевищує заявлених граничних значень ( $\epsilon$  запас);
- FC може відправляти команди тригеру та отримувати статус гімбалу.

## **4. ТЕСТОВІ КРИТЕРІЇ ТА ПРОЦЕДУРИ**

### **1) Камера**

- Статичний тест: зняти статичну тарілку з відомою температурою — перевірити NETD/радіометрію.
- Летючий тест: зняти дах на 50 м — перевірити чіткість, масштаб зображення та наявність рохля (motion blur).

### **2) Механіка/мотор**

- Балансування: встановити камеру, відрегулювати СМ, перевірити статичний кут  $\leq 5^\circ$ .
- Динамічний тест: вмикати мотори на різних швидкостях, контролювати струм, виміряти вібрації (акселерометр).
- Вага/вантаж: підвіс витримує payload + 25% запас.

### **3) Електроніка**

- Комунікація: відправити команди на SBus/UART, перевірити відповідь.
- Піковий тест: симуляція різких рухів — перевірити, що плата витримує піковий струм і не перезавантажується.
- Fail-safe: відключити команду — системи переходят у безпечний режим.

## 5. ШАБЛОН ТАБЛИЦІ ТТХ

<b>Компонент</b>	<b>Параметр</b>	<b>Мінімум</b>	<b>Рекомендовано</b>	<b>Ідеал</b>
Камера (IR)	Роздільна здатність	320×240	640×512	>640×512
Камера (IR)	NETD	≤100 mK	≤50 mK	≤30 mK
Камера (IR)	Радіометрія	опціонально	бажано	обов'язково
Камера (IR)	Вага	—	≤700 g	≤300 g (OEM)
Гімбал	Ося	2-осьовий	2-осьовий	3-осьовий
Гімбал	Вага (без камери)	≤1000 g	≤800 g	≤600 g
Мотори	Струм (пік)	залежить	запас 1.5×	запас 2×
Контролер гімбалу	Sampling rate	≥100 Hz	≥200 Hz	≥400 Hz
Інтерфейси		SBus + UART	SBus + UART + PWM	SBus + UART + CAN + MAVLink

## **Формулювання завдання (Варіант 1)**

На основі аналізу потреб замовника можна сформулювати конкретне технічне завдання:

### **1) Призначення підвісу**

- Забезпечення стабілізованого знімання з двох камер (тепловізійної та RGB) під час інспекції будівель.
- Підвіс має бути сумісним із більшістю комерційних і напівпрофесійних дронів.

### **2) Функціональні вимоги**

- Двоступенева стабілізація (2 осі: pitch та roll).
- Підтримка роботи з **двох камерами одночасно** (тепловізійна AV-камера + RGB AV-камера).
- Передача сигналу з двох камер на польотний контролер із можливістю мікшування.
- Захист камер від вібрацій та розмиття.

### **3) Технічні вимоги**

- Вага підвісу: мінімальна (щоб не знижувати тривалість польоту).
- Габарити: компактні (для використання на дронах малого та середнього класу).
- Живлення: від основної батареї дрона (через перетворювач).
- Інтерфейси керування: **SBus та UART**.
- Двигуни підвісу: із запасом по потужності та точністю стабілізації.

#### **4) Економічні вимоги**

- Використання доступних комплектуючих (бюджетний варіант).
- Можливість самостійного виготовлення або доопрацювання конструкції.

#### **5) Умови експлуатації**

- Робота на відкритому повітрі при різних погодних умовах.
- Надійна робота при вітрі та різких маневрах дрона.

## ПРИКЛАДИ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ — АНАЛІЗ

### Приклад 1: Workswell WIRIS Pro

#### TTX / ключові характеристики:

- Роздільна здатність (тепловізійна): **640×512 px** в нормальному режимі. [Workswell](#)
- Має «Super Resolution Mode», який дозволяє отримати кінцеві кадри розміром **1266×1010 px** [Workswell](#)
- RGB камера: Full HD (1920×1080 px) з оптичним zoom 10× (з реального режиму 6,9° до 58,2° FOV) [Workswell](#)
- Спектральний діапазон тепловізора: LWIR (7,5 – 13,5 μm) [Workswell](#)
- Оптика: широкий діапазон FOV / zoom у RGB-каналі. [Workswell](#)

#### Сильні сторони:

- Дуже гнучкий — має Super Resolution режим, що дає «плюс» в деталізації.
- Комбінована система з RGB + тепловізійним сенсором — зручно для порівнянь з візуальним зображенням.
- Промислова готовність — має інтерфейси, конструкцію, стабільну збірку.

#### Слабкі сторони:

- Досить висока ціна — для бюджетного варіанта може бути дорогим.
- Вага та розміри — може бути складно інтегрувати в дуже легкий підвіс.
- Потрібна професійна інтеграція (не «plug-and-play» для малого DIY).

#### Оцінка відповідності ТЗ:

- Перевага: задовольняє вимогу dual-sensor (RGB + IR).
- Недолік: може перевищувати бюджет і вимагати підсилення механічної частини.
- Підходить як один із преміальних варіантів порівняння.

## Приклад 2: Autel EVO II Dual / Dual 640

### Характеристики:

- Тепловізійна камера: **640×512 px**, NETD < 50 mK [Autel Robotics+1](#)
- FOV тепловізора: ~32° [Autel Robotics](#)
- Зйомка RGB + IR одночасно (Dual) [Autel Robotics+1](#)
- Оптичний / цифровий zoom: 1–8× [Autel Robotics](#)

### Сильні сторони:

- Комбінована (dual) система вже інтегрована — зручно для польотів без окремих камер.
- Досить популярний і розповсюджений — багато прикладів і досвіду інтеграції.
- Баланс можливостей і вартості — не надто дорогий, але дає добру якість.

### Слабкі сторони:

- Часто не дозволяє змінювати параметри тепловізійного сенсора, обмежує кастомізацію.
- Вага та енергоспоживання можуть бути занадто високими для мінімалістичного підвісу.
- Можливі обмеження по інтерфейсам (не завжди гнучкі SBUS / UART) залежно від модифікації.

### Оцінка відповідності твоєму ТЗ:

- Підходить як готовий модуль, але не дає повну свободу вибору — годиться як приклад «що є на ринку», до якого твій варіант має конкурувати.

## Приклад 3: DJI Zenmuse XT2

### Характеристики:

- Радіометричний тепловізійний сенсор, діапазон температур, dual-sensor (IR + RGB) [1UP Drones](#)
- Частота кадрів: 30 Hz (для тепловізора) [1UP Drones](#)
- Корпус класу IP44, захищений корпус [1UP Drones](#)

### Сильні сторони:

- Професійне рішення з кріпленням на DJI платформах — надійність і стабільність.
- Радіометричність — можливість вимірювання температури на пікселі.
- Гарна підтримка й документація.

### Слабкі сторони:

- Висока ціна — часто недосяжна для студентських бюджетів.
- Можливі обмеження в адаптації до некласичних підвісів або довільної електроніки.

### Оцінка:

- Це «еталон» у промислових системах — твій підвіс має прагнути до рівня стабільності / точності, яку дає Zenmuse XT2, але знижувати вартість.

## Приклад 4: M2-D Mini Gyro Stabilized EO/IR Gimbal

### Характеристики:

- Вага: ~160 грамів (payload з EO/IR) [SPI Corp](#)
- Включає як тепловізійний канал, так і EO (видимий) канал в одному компактному корпусі. [SPI Corp](#)
- Підтримка zoom в обох каналах (тепловізійний + EO). [SPI Corp](#)

### **Сильні сторони:**

- Дуже мала маса — хороший приклад для легких підвісів.
- Інтегрований dual-канал — менше окремих блоків.
- Готовий стабілізований gimbal з EO/IR — мінімальна інтеграція.

### **Слабкі сторони:**

- Ймовірно дорожчий порівняно з окремими модульними рішеннями (за той же клас).
- Можливості калібрування сенсорів можуть бути обмежені.

### **Оцінка:**

- Дуже цікавий як приклад для компактного dual-модуля, особливо для малих дронів.
- Підвіс на такій базі може стати прикладом для твого проекту в легкому класі.

## Порівняльна таблиця моделей

<b>Модель / рішення</b>	<b>Роздільна здатність (IR)</b>	<b>Dual / комбінованіс- ть</b>	<b>Вага / компактніс- ть</b>	<b>Сильні сторони</b>	<b>Слабкі сторони</b>
Workswe-ll WIRIS Pro	640×512 (SuperRes до 1266×1010)	IR + RGB	середня / велика	гнучкість, zoom, професійність	ціна, вага
Autel EVO II Dual 640	640×512	IR + RGB	середня	готова dual-система, хороша якість	обмежена кастомізація, вага
DJI Zenmuse XT2	— (радіометричний dual)	IR + RGB	професійна вага	еталон у промислових рішеннях	висока ціна, обмеження адаптації
M2-D Mini EO/IR Gimbal	~640×512 / EO + IR	dual	дуже мала вага (~160 г)	компактний dual блок, мінімальна інтеграція	можлива обмежена гнучкість, ціна

## **Порівняння та доведення доцільності розробки власного підвісу**

### **1) Проблеми існуючих рішень**

На ринку присутні як **преміальні рішення** (DJI Zenmuse XT2, Workswell WIRIS Pro), так і **більш доступні варіанти** (Autel EVO II Dual, M2-D Mini EO/IR Gimbal). Вони демонструють високий рівень технологічності, проте мають ряд обмежень:

- **Висока ціна** (від \$5 000 до \$15 000 і вище), що робить їх недоступними для масового застосування.
- **Закриті екосистеми** — більшість готових підвісів інтегруються лише з власними дронами (наприклад, DJI), а підключення до сторонніх систем обмежене.
- **Вага та енергоспоживання** — готові професійні рішення досить важкі, що знижує тривалість польоту, особливо на мультироторних платформах малого класу.
- **Обмежена кастомізація** — немає можливості встановити нестандартні або спеціалізовані сенсори (лише те, що пропонує виробник).

### **2) Переваги запропонованої моделі**

Розробка бюджетного підвісу з відкритою архітектурою дає низку переваг:

#### **1. Економічність**

- Використання доступних камер і електроніки значно знижує вартість у порівнянні з брендовими рішеннями.
- Це робить систему придатною для навчальних цілей, невеликих компаній і лабораторій.

## **2. Гнучкість та кастомізація**

- Можливість вибору різних моделей камер (RGB, тепловізор) залежно від бюджету і завдань.
- Підвіс можна адаптувати під будь-який дрон (мультиротор, гексакоптер тощо).

## **3. Технічні можливості**

- Двоступенева стабілізація (pitch, roll) забезпечить достатній рівень компенсації вібрацій для якісної аерозйомки.
- Інтерфейси **SBus** та **UART** дозволяють інтегрувати систему з більшістю сучасних польотних контролерів.
- Можливість перемикання між RGB і тепловізійною камерою під час польоту.

## **4. Зниження ваги**

- За рахунок використання окремих компактних камер і моторів невеликої потужності можна досягти малої ваги підвісу, що критично для тривалості польоту.

## **3. Очікувані сфери застосування**

- **Будівельна інспекція** (тепловтрати, пошук дефектів утеплення).
- **Енергетика** (перевірка сонячних панелей, кабельних трас, трансформаторів).
- **Рятувальні операції** (пошук людей уночі або в диму).
- **Сільське господарство** (моніторинг стану рослин із базовими RGB/IR рішеннями).

## **Підбір комплектуючих**

Для реалізації проєкту було підібрано основні апаратні елементи, які забезпечують виконання вимог до підвісу: підтримка RGB та тепловізійної камери, мінімальна вага і вартість, сумісність з інтерфейсами SBUS/UART, а також можливість передачі змішаного AV-сигналу через польотний контролер.

### **1) Тепловізійна камера**

- **Модель:** Caddx IRC-640CA Thermal Camera
- **Роздільна здатність:** 640×512 px
- **Призначення:** виявлення тепловтрат при індустріальних обстеженнях будівель
- **Переваги:** висока чутливість, можливість виявлення дрібних теплових аномалій, легка інтеграція з підвісом
- **Орієнтовна ціна:** 33 500 грн

Альтернативний бюджетний варіант: Thermal FPV Camera 256×192 ( $\approx$ 7 500 грн)  
- підходить для менш вимогливих завдань, однак має нижчу деталізацію.

### **2) RGB-камера**

- **Модель:** Mapir Survey3 RGB
- **Характеристики:** 12 Мп, підтримка зовнішнього GPS, керування через PWM
- **Призначення:** отримання візуального (кольорового) зображення для суміщення з тепловізійними даними
- **Переваги:** легка, висока якість зображення, сумісність з дронами та гімбалами

### **3) Двигуни для підвісу (gimbal motors)**

- **Модель:** T-Motor GB36-2 KV30
- **Живлення:** 3S–6S LiPo
- **Навантаження:** до 1.9 кг
- **Призначення:** стабілізація підвісу у двох осіах
- **Переваги:** низький рівень вібрацій, висока точність позиціонування, hollow shaft для компактності

### **4) Плата керування підвісом (Gimbal controller)**

- **Модель:** SimpleBGC 32-bit (або аналог з підтримкою UART/SBus)
- **Призначення:** керування двигунами підвісу, стабілізація камер, налаштування PID-регуляторів
- **Функціонал:** підключення через UART/SBus, телеметрія, калібрування

### **5) Польотний контролер**

- **Модель:** Pixhawk 4 (або Cube Orange як альтернатива)
- **Призначення:** керування дроном, інтеграція сигналів від підвісу та камер
- **Функціонал:** підтримка UART/SBus, можливість передачі змішаного AV-сигналу, сумісність із більшістю програмних платформ (Ardupilot, PX4)

## Очікувані технічні характеристики

Параметр	Мінімум	Рекомендовано	Ціль/Ідеал	Коментар
<b>Payload (підтримувана маса камери)</b>	300 г	500–700 г	900–1200 г (з запасом 1.5–2×)	Обирати під камеру + кабелі + кріplення.
<b>Вага підвісу (без камер)</b>	$\leq 1000$ г	$\leq 800$ г	$\leq 600$ г	Менша вага — довший час польоту.
<b>Габарити підвісу (застосовні для CAD)</b>	—	база 160×120×120 мм	zmіnni за камерою	Вказати у кресленнях.
<b>Роздільна здатність IR (підтримувана камера)</b>	320×240 px	640×512 px	$\geq 640\times 512$ px (радіометрична)	Радіометрія — бажана для точних вимірюв. (Boson / WIRIS приклади). <a href="#">(HubSpot)</a>
<b>NETD (теплова чутливість)</b>	$\leq 100$ mK	$\leq 50$ mK	$\leq 30\text{--}40$ mK	Менший NETD — кращі деталі тепловтрат (WIRIS 30 mK). <a href="#">(Workswell)</a>
<b>Кутова точність стабілізації (кути утримання)</b>	$\pm 1.0^\circ$	$\pm 0.5^\circ$	$\pm 0.1^\circ\text{--}0.2^\circ$ (профі)	Залежить від моторів і контролера.

Параметр	Мінімум	Рекомендовано	Ціль/Ідеал	Коментар
<b>Частота керування (controller IMU loop)</b>	$\geq 100 \text{ Hz}$	$\geq 200 \text{ Hz}$	$\geq 400\text{--}2000 \text{ Hz}$ (профі контролери)	Більш висока — краща компенсація вібрацій (Gremsy/ SimpleBGC).  <a href="#">(BaseCam Electronics)</a>
<b>Живлення (вхід підвісу)</b>	5–12 V (OEM модулі)	12–24 V (через UBEC)	15–52 V (індустріальні контролери, Gremsy)	Обирати залежно від контролера; забезпечити DC-DC.  <a href="#">(Gremsy Documentation)</a>
<b>Піковий струм на мотор (на канал)</b>	залежить від мотора	забезпечити плату з запасом $\geq 1.5\times$	запас $\geq 2\times$	Напр., SimpleBGC OEM: пік 5 A, ~1.5 A постійно.  <a href="#">(BaseCam Electronics)</a>
<b>Діапазон робочих температур</b>	$-10 \dots +50^\circ\text{C}$	$-20 \dots +60^\circ\text{C}$	$-30 \dots +60^\circ\text{C}$	Залежить від камери та контролера; врахуй акумулятор. (Caddx/FLIR)

Параметр	Мінімум	Рекомендовано	Ціль/Ідеал	Коментар
				приклади). ( <a href="http://hobbydrone.cz">hobbydrone.cz</a> )
<b>Захист корпусу (рівень IP)</b>	IP40	IP54	IP67 (вологозахищений)	Для вуличних інспекцій рекомендується IP54+.
<b>Інтерфейси керування</b>	PWM trigger	UART + PWM	SBUS + UART + CAN + MAVLink	<b>Обов'язково:</b> SBUS та UART — згідно ТЗ. ( <a href="#">Gremsy Documentation</a> )
<b>Логування / зберігання даних</b>	SD на камері	SD / SSD (на контролері)	вбудований SSD 128–256 GB (WIRIS Pro)	Для інспекцій бажана локальна архівація. ( <a href="#">Workswell</a> )

## РОЗРОБКА 3D-МОДЕЛІ ПІДВІСУ

У середовищі SOLIDWORKS було розроблено модель двохосьового підвісу.

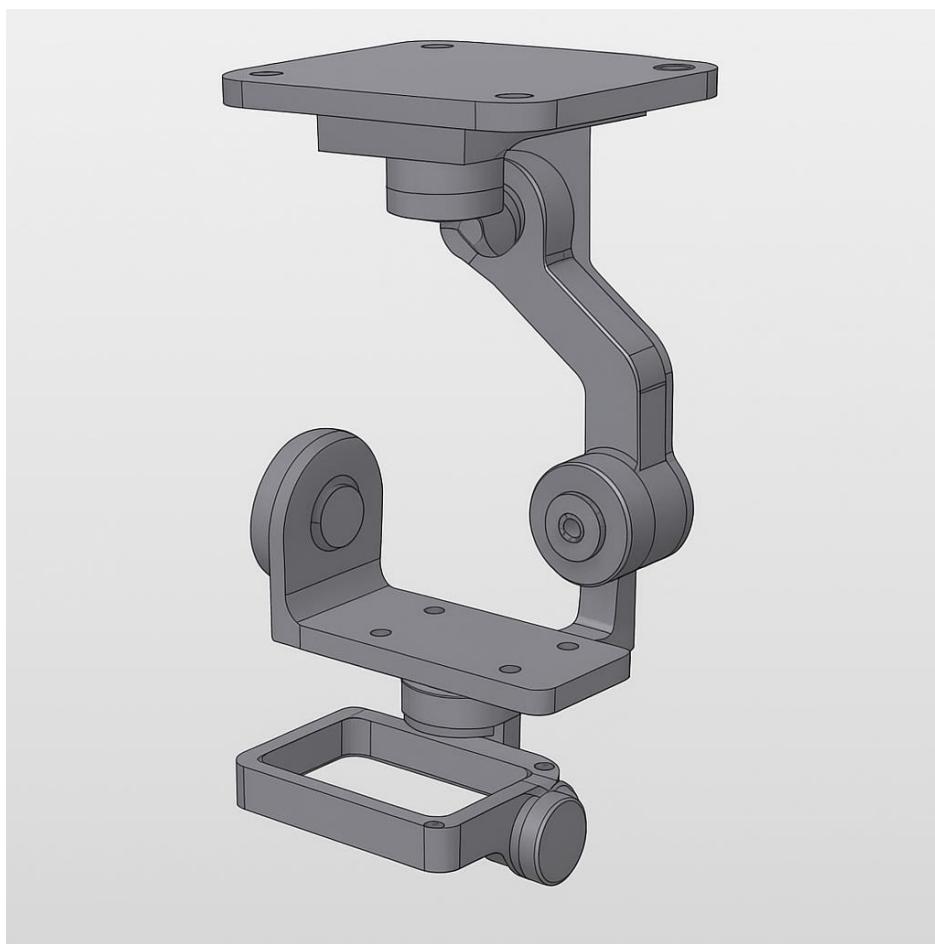


Рисунок 1 – 3D-модель двохосьового підвісу

На рисунку 1 зображено ескіз двохосьового підвісу, призначеного для встановлення RGB та тепловізійної AV-камери. Конструкція складається з базової рами для кріплення до літального апарату, вертикальної та горизонтальної осей стабілізації, а також платформи для камер. Такий підвіс забезпечує мінімізацію вібрацій та стабільне зображення під час інспекції будівель.

## **ВИСНОВКИ**

Запропонована модель бюджетного двохосового підвісу є оптимальною завдяки поєднанню простоти конструкції, низької собівартості та достатніх функціональних можливостей для виконання індустріальних завдань. Використання стандартних електронних інтерфейсів (SBus, UART) та змішаного АВ-сигналу забезпечує сумісність із більшістю сучасних польотних контролерів.

Основні сфери застосування:

- **будівлі та споруди** – моніторинг тепловтрат, тріщин та деформацій;
- **енергоаудит** – визначення ефективності теплоізоляції та зон підвищених втрат енергії;
- **безпека та інспекція** – контроль інженерних систем, виявлення несправностей, запобігання аваріям.

Переваги над готовими системами:

- значно **нижча вартість** у порівнянні з комерційними аналогами;
- можливість **кастомізації під конкретні задачі** (вибір сенсорів, налаштування програмного забезпечення, адаптація під різні платформи);
- **зменшена вага та компактність**, що важливо для безпілотних апаратів;
- відкритість конструкції для подальшої модернізації.

Таким чином, розроблений підвіс забезпечує баланс між ціною, функціональністю та можливістю адаптації, що робить його доцільним рішенням для практичного використання у сфері технічного обстеження будівель.

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Li W., Wang Q. Design and stabilization of gimbal systems for UAVs // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2020. – Vol. 28, №5. – P. 1756–1765.
2. Zhang J., et al. Development of lightweight camera gimbals for aerial drones // Sensors. – 2019. – Vol. 19, №15. – Article 3295.
3. Kumar R., Patil S. 3-axis gimbal stabilization for UAV photography: A review // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2021. – Vol. 102, №2. – P. 45–60.
4. DJI Technology. Understanding Gimbal Technology for Drones. DJI Technical Whitepaper. – 2022. – Available at: <https://www.dji.com/>
5. Tekin R. Drone Payload and Stabilization Systems. Springer. – 2020.
6. DroneLife. Drone Gimbal and Camera Reviews. – Available at: <https://dronelife.com/>
7. RC Groups Forum. DIY Drone Gimbals Discussions. – Available at: <https://www.rcgroups.com/forums/showthread.php>
8. YouTube. DIY Drone Gimbal Stabilization Tutorials. – Available at: <https://www.youtube.com/>
9. Coursera / Udemy. Drone Design and Aerial Photography Courses. – Available at: <https://www.coursera.org/>, <https://www.udemy.com/>