МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут»

Кафедра мехатроніки та електротехніки

РЕФЕРАТ

з дисципліни «Мехатронні системи»

(назва дисципліни)

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

Здобувача освіти 359 групи

Велигоря О.В. \_

(прізвище та ініціали студента)

Освітня програма: Комп’ютерно - інтегровані технологічні процеси і виробництва»

Прийняв: доцент, к.т.н., доцент

Кочук С.Б.\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

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

Національна шкала Кількість балів

м. Харків – 2025

**Аналіз потреб замовника**

Для завдання **“Розробити бюджетний підвіс для індустріального обстеження будівель на предмет тепловтрат”** замовнику потрібно отримати систему, яка дозволить:

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.

**A. Тепловізійна камера — очікувані характеристики**

**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.

1. **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.

1. **Радіометричність (ability to output temperature values):**
   * Обов’язково в ідеалі — **радіометрична** (з можливістю калібрування).
   * Мінімум — можливість експортувати термальні кадри для постобробки.

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

1. **Оптика / FOV (Field of View) і фокус:**
   * Типово: FOV ≈ **25–45°** для балансу покриття/деталі.
   * Оптичний zoom — бажано (перевага для фасадних інспекцій).
   * Можливість зміни лінз/фокусування (мін./макс. фокусні відстані).

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

1. **Формат виводу та інтерфейси:**
   * Відео (RTSP/HDMI/RAW) і/або серійний (UART) для telemetriy.
   * Підтримка **PWM** для тригеру/синхронізації, або API для trigger.
   * Підтримка логування на SD або стрімінг на назем. Принаймні **UART/USB** для скачування даних.
2. **Вага та габарити:**
   * Рекомендовано: **≤ 700 г** (щоб вписуватись у цільовий payload).
   * Ідеал (OEM модуль): значно менше — 30–200 г, плюс корпус.
3. **Параметри живлення:**
   * Напруга: **5–24 V** (вказати у специфікації), енергоспоживання ~ залежить від модуля.
   * Наявність вбудованого стабілізатора — плюс.
4. **Діапазон робочих температур:**
   * Мінімум: **−10…+50 °C**.
   * Бажано: **−20…+60 °C** — для польових умов.
5. **Додаткові опції:**
   * Вбудований RGB (dual-sensor) — великий плюс.
   * GPS/TimeStamp синхронізація кадрів.
   * SDK / API для автоматизації обробки.

**Критерії приймання камери**

* Роздільна здатність ≥ обраного рівня і NETD ≤ 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).

**B. 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 ≤ **800 г** (без камери).
4. **Коефіцієнт запасу по payload:** мінімум **1.5×** від маси камери; краще — **2×**.
   * Тобто, якщо камера 600 г → підвіс розраховувати на ≥ 900–1200 г робочого навантаження.

**Двигуни (brushless gimbal motors) — параметри для вибору**

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 CM та маси камери. Як правило, для payload ~600 г потрібні мікро-до-міні мотори з номінальним крутним моментом, достатнім для тримання ± рухів; практично — орієнтир у характеристиках виробника.
3. **Струм (робочий / пік):**
   * Мотор має витримувати пікові струми при різких маневрах; плата керування повинна мати запас **≥ 1.5–2×** 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 ~5–10 mm;
* Монтажні отвори узгоджені зі стандартом платформи коптера (або адаптери).

**Критерії приймання механіки/моторів**

* Підвіс витримує статичне навантаження (payload + ± запас) без деформації;
* Балансування: центр мас вирівняний, статичний кут ≤ 5°;
* Підвіс забезпечує стабільність при симуляції вітру (на землі або під час польоту) відповідно до вимог кутової точності.

**C. Електроніка: 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.

**C1 — 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) **≥ 100–400 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 **1.5–2×**; 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.

**C2 — 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 (є запас);
* FC може відправляти команди тригеру та отримувати статус гімбалу.

**D. Тестові критерії та процедури (як перевіряти кожен блок)**

**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 CM, перевірити статичний кут ≤ 5°.
* 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 переходять у безпечний режим.

**E. Шаблон таблиці ТТХ**

| **Компонент** | **Параметр** | **Мінімум** | **Рекомендовано** | **Ідеал** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 (для 1-го варіанту)**

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 **двома 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**

* **ТТХ / ключові характеристики:**
  + Роздільна здатність (тепловізійна): **640×512 px** в нормальному режимі. [Workswell](https://workswell.eu/thermal-drone-camera-inspection-wiris-pro/?utm_source=chatgpt.com)
  + Має «Super Resolution Mode», який дозволяє отримати кінцеві кадри розміром **1266×1010 px** [Workswell](https://workswell.eu/thermal-drone-camera-inspection-wiris-pro/?utm_source=chatgpt.com)
  + RGB камера: Full HD (1920×1080 px) з оптичним zoom 10× (з реального режиму 6,9° до 58,2° FOV) [Workswell](https://workswell.eu/thermal-drone-camera-inspection-wiris-pro/?utm_source=chatgpt.com)
  + Спектральний діапазон тепловізора: LWIR (7,5 – 13,5 μm) [Workswell](https://workswell.eu/thermal-drone-camera-inspection-wiris-pro/?utm_source=chatgpt.com)
  + Оптика: широкий діапазон FOV / zoom у RGB-каналі. [Workswell](https://workswell.eu/thermal-drone-camera-inspection-wiris-pro/?utm_source=chatgpt.com)
* **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 твоєму 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](https://shop.autelrobotics.com/pages/evo-ii-dual-specification?utm_source=chatgpt.com)
  + FOV тепловізора: ~32° [Autel Robotics](https://shop.autelrobotics.com/pages/evo-ii-dual-specification?utm_source=chatgpt.com)
  + Зйомка RGB + IR одночасно (Dual) [Autel Robotics+1](https://shop.autelrobotics.com/pages/evo-ii-dual-specification?utm_source=chatgpt.com)
  + Оптичний / цифровий zoom: 1–8× [Autel Robotics](https://shop.autelrobotics.com/pages/evo-ii-dual-specification?utm_source=chatgpt.com)
* **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](https://1updrones.com/product/zenmuse-xt-2-640x512-19mm/?utm_source=chatgpt.com)
  + Частота кадрів: 30 Hz (для тепловізора) [1UP Drones](https://1updrones.com/product/zenmuse-xt-2-640x512-19mm/?utm_source=chatgpt.com)
  + Корпус класу IP44, захищений корпус [1UP Drones](https://1updrones.com/product/zenmuse-xt-2-640x512-19mm/?utm_source=chatgpt.com)
* **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](https://www.x20.org/m2-d-mini-gyro-stabilized-eoir-uav-uas-multicopter-drone-flir-thermal-imaging-camera-turret-ball/?utm_source=chatgpt.com)
  + Включає як тепловізійний канал, так і EO (видимий) канал в одному компактному корпусі. [SPI Corp](https://www.x20.org/m2-d-mini-gyro-stabilized-eoir-uav-uas-multicopter-drone-flir-thermal-imaging-camera-turret-ball/?utm_source=chatgpt.com)
  + Підтримка zoom в обох каналах (тепловізійний + EO). [SPI Corp](https://www.x20.org/m2-d-mini-gyro-stabilized-eoir-uav-uas-multicopter-drone-flir-thermal-imaging-camera-turret-ball/?utm_source=chatgpt.com)
* **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 проєкту в легкому класі.

**Порівняльна таблиця моделей (узагальнена)**

| **Модель / рішення** | **Роздільна здатність (IR)** | **Dual / комбінованість** | **Вага / компактність** | **Сильні сторони** | **Слабкі сторони** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Workswell 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** дозволять 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 (≈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 осях
* **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**

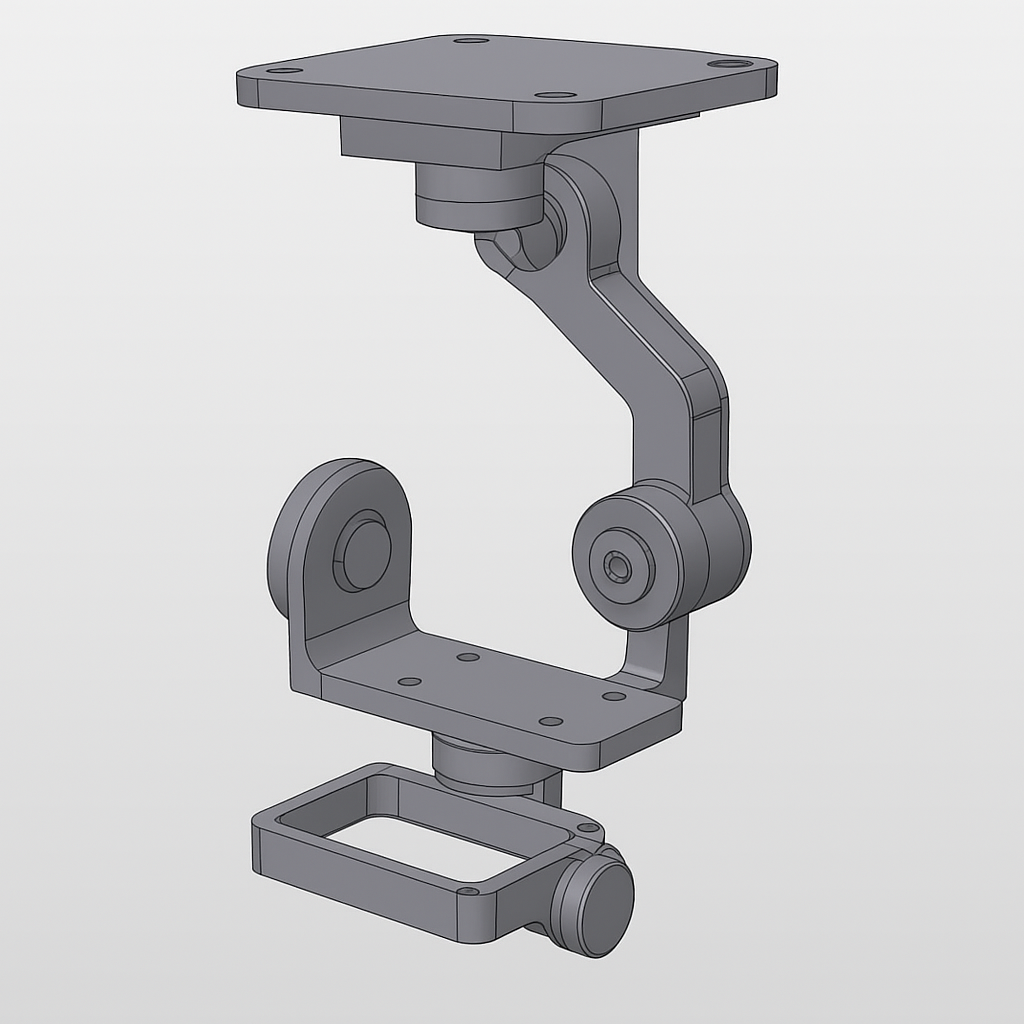
| **Параметр** | **Мінімум** | **Рекомендовано** | **Ціль/Ідеал** | **Коментар** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Payload (підтримувана маса камери)** | 300 г | 500–700 г | 900–1200 г (з запасом 1.5–2×) | Обирати під камеру + кабелі + кріплення. |
| **Вага підвісу (без камер)** | ≤ 1000 г | ≤ 800 г | ≤ 600 г | Менша вага — довший час польоту. |
| **Габарити підвісу (застосовні для CAD)** | — | база 160×120×120 мм | змінні за камерою | Вказати у кресленнях. |
| **Роздільна здатність IR (підтримувана камера)** | 320×240 px | 640×512 px | ≥ 640×512 px (радіометрична) | Радіометрія — бажана для точних вимірів. (Boson / WIRIS приклади). ([HubSpot](https://f.hubspotusercontent10.net/hubfs/20335613/flir-boson-datasheet.pdf?utm_source=chatgpt.com)) |
| **NETD (теплова чутливість)** | ≤ 100 mK | ≤ 50 mK | ≤ 30–40 mK | Менший NETD — кращі деталі тепловтрат (WIRIS 30 mK). ([Workswell](https://workswell.eu/thermal-drone-camera-inspection-wiris-pro/?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Кутова точність стабілізації (кути утримання)** | ±1.0° | ±0.5° | ±0.1°–0.2° (профі) | Залежить від моторів і контролера. |
| **Частота керування (controller IMU loop)** | ≥ 100 Hz | ≥ 200 Hz | ≥ 400–2000 Hz (профі контролери) | Більш висока — краща компенсація вібрацій (Gremsy/ SimpleBGC). ([BaseCam Electronics](https://www.basecamelectronics.com/simplebgc32bit/?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Живлення (вхід підвісу)** | 5–12 V (OEM модулі) | 12–24 V (через UBEC) | 15–52 V (індустріальні контролери, Gremsy) | Обирати залежно від контролера; забезпечити DC-DC. ([Gremsy Documentation](https://docs.gremsy.com/gimbals/gremsy-t3v3/getting-started/specification?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Піковий струм на мотор (на канал)** | залежить від мотора | забезпечити плату з запасом ≥1.5× | запас ≥2× | Напр., SimpleBGC OEM: пік 5 A, ~1.5 A постійно. ([BaseCam Electronics](https://www.basecamelectronics.com/sbgc32_oem/?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Діапазон робочих температур** | −10 … +50 °C | −20 … +60 °C | −30 … +60 °C | Залежить від камери та контролера; врахуй акумулятор. (Caddx/FLIR приклади). ([hobbydrone.cz](https://www.hobbydrone.cz/en/fpv-thermal-camera-caddxfpv-irc-640ca/?srsltid=AfmBOooqIJZ3KLrvyay1AMrwQGFIg4LwZ4m7r8AbIdAq8ugu9wMiP86J&utm_source=chatgpt.com)) |
| **Захист корпусу (рівень IP)** | IP40 | IP54 | IP67 (вологозахищений) | Для вуличних інспекцій рекомендується IP54+. |
| **Інтерфейси керування** | PWM trigger | UART + PWM | SBUS + UART + CAN + MAVLink | **Обов'язково:** SBUS та UART — згідно ТЗ. ([Gremsy Documentation](https://docs.gremsy.com/gimbals/gremsy-t3v3/getting-started/specification?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Логування / зберігання даних** | SD на камері | SD / SSD (на контролері) | вбудований SSD 128–256 GB (WIRIS Pro) | Для інспекцій бажана локальна архівація. ([Workswell](https://my.workswell.eu/download/file/33/en?utm_source=chatgpt.com)) |

**Перелік креслень/видів у кожному файлі**

* Загальний вигляд (isometric).
* Вид спереду, знизу, збоку (з клемами/місцями кріплення).
* Таблиця матеріалів (BOM short) з позиціями (посиланнями на довідкові артикулі).
* Вказати точки кріплення для швидкого монтажу на раму коптера (4×M4, відстані центр-центр).
* Вказати центр маси (CM) та регулятор положення CM (slot або гайка).
* Вказати мінімальні зазори для кабелів і довжини заглушок.

**Формат і вимоги до файлів**

* Зберегти усі робочі файли у FreeCAD (.FCStd) та експортувати STEP (.step/.stp) і PDF з кресленнями.
* Іменування файлів за шаблоном: <part>\_v1.0.step, <assembly>\_v1.0.fcstd.
* Додати readme\_cad.md з короткою інструкцією: інструмент/версія FreeCAD, одиниці (mm), стандарт різьблення (M4/M5), матеріали.



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

**Висновки / обґрунтування доцільності**

Запропонована модель бюджетного двохосьового 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 AV-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 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/