

Курс: “Бортові системи БПЛА”

Викладач: к.т.н., старший викладач, Іван Володимирович Жежера
Тема лабораторної роботи: “Створення аванпроекту”

Виконав: студент Бромірський Роман

Мета: Реалізація економіко-технічного обґрунтування доцільності розроблення продукції та шляхів її створення, виробництва та експлуатації.

АВАНПРОЄКТ: ПЛАНЕР ДЛЯ ФОТОГРАМЕТРИЧНОГО ЗНІМАННЯ

1. Опис проблеми та обґрунтування вибору рішення

1.1 Опис проблематики

На сучасному ринку БПЛА для картографування та фотограмметрії спостерігається значний ціновий та технологічний розрив. З одного боку, існують професійні комплекси вартістю понад 20 000 USD, які є фінансово недоступними для багатьох споживачів. З іншого боку, присутні бюджетні рішення, які часто мають низьку якість збірки та недостатню автономність для виконання масштабних завдань.

Основними проблемами існуючих систем у бюджетному сегменті є:

- **Висока вартість за гідні характеристики:** Сегмент середньої цінової категорії (до 10 000 USD) наразі є найбільш вільним, оскільки пропозиції або занадто дорогі, або не відповідають технічним вимогам.
- **Обмежена продуктивність:** Більшість доступних дрон-систем не забезпечують необхідного часу перебування в повітрі для охоплення великих площ за один виліт.
- **Низька роздільна здатність сенсорів:** Для якісної фотограмметрії необхідні повнокадрові матриці високої роздільної здатності, які рідко зустрічаються в інтегрованих бюджетних рішеннях.

Метою даного аванпроєкту є створення апарату вартістю до 10 000 USD, який займе вільну нішу, пропонуючи професійні можливості за помірну ціну.

1.2 Обґрунтування вибору типу апарату (Планер)

Для виконання завдань з фотограмметричного знімання обрано БПЛА літакового типу (планер). Вибір даної схеми зумовлений наступними факторами:

- **Енергоєфективність та автономність:** Використання підйомної сили крила дозволяє досягти тривалості польоту від 90 хвилин до 120 хвилин, що значно перевищує можливості мультироторних систем.
- **Максимальне охоплення території:** Завдяки високій крейсерській швидкості та тривалості польоту, літак здатний відзняти значно більшу кількість гектарів за один робочий цикл.
- **Економічна доцільність:** Створення власної «начинки» на базі планера дозволяє досягти ідеального балансу між ціною кінцевого продукту та його продуктивністю.
- **Спеціалізована конструкція:** Форма планера дозволяє реалізувати захищені схеми посадки (наприклад, на фюзеляж-санки або парашутну систему), що критично важливо для збереження дорогої оптики.

1.3 Режими роботи та цільове призначення

Апарат розроблено для роботи в напівавтоматичному та автоматичному режимах за задалегідь побудованим маршрутом. Основним корисним навантаженням є повнокадрова камера з роздільною здатністю 61 Мп, що забезпечує високу деталізацію зображень для створення точних ортофотопланів та 3D-моделей місцевості.

2. Аналіз ринку та порівняння характеристик

2.1 Огляд ринкової ситуації

На сьогодні ринок БПЛА для фотограмметрії чітко розділений на два полюси. Перший — це високоякісні закордонні комплекси (наприклад, WingtraOne або SenseFly eBee), ціна яких стартує від 20 000–30 000 USD. Другий — це бюджетні рішення на базі аматорських платформ, які мають низьку якість виконання, малий час польоту та не розраховані на інтенсивну професійну експлуатацію. Наша задача — створити апарат у ціновому сегменті до 10 000 USD, який за характеристиками автономності та якості зйомки буде наближений до професійних систем, але при цьому залишиться доступним для ширшого кола користувачів.

2.2 Порівняльна характеристика рішень

Для обґрунтування переваг нашої розробки наведено порівняння основних параметрів типових представників ринку та нашого проєкту:

Характеристика	Аматорський сектор	Наш проєкт (Планер)	Професійні системи
Час у повітрі	30–40 хв	90–120 хв	60–90 хв
Камера	12–20 Мп (мала матриця)	61 Мп (Full frame)	61 Мп (Full frame)
Продуктивність за виліт	до 100 га	від 400 га	400–600 га
Ціна системи	1 500 – 3 000 USD	до 10 000 USD	25 000+ USD

2.3 Переваги власної розробки

Створення власного варіанту на базі підібраної компонентної бази дає нам наступні переваги:

- **Цінове лідерство:** Ми займаємо найбільш вільний на сьогодні сегмент ринку, пропонуючи високу якість за ціну, що у 2-3 рази нижча за імениті аналоги.
- **Висока ефективність зйомки:** Завдяки розрахунковому часу польоту до 2 годин, наш дрон може відзняти значно більше гектарів за один виліт, ніж конкуренти у тій же цінній категорії.

- **Оптимізація під задачу:** Використання повнокадрової камери на 61 Мп дозволяє отримувати дані з високою роздільною здатністю (GSD), що є ключовим для якісної фотограмметрії.
- **Надійність конструкції:** Використання композитних матеріалів (кевлар, карбон) у критичних вузлах фюзеляжу забезпечує довговічність апарату при багаторазових посадках.

3. Специфікація компонентної бази та технічне обґрунтування

Для забезпечення високої надійності та досягнення польотного часу до 120 хвилин обрано архітектуру на базі напруги 6S (22.2V – 25.2V). Це рішення дозволяє мінімізувати силу струму, зменшити нагрівання провідників та підвищити загальний ККД силової установки.

3.1 Мозок та навігаційна система

- **Польотний контролер:** Hex Orange Cube+ (з Carrier Board). Це центральний обчислювальний модуль апарату, що побудований на потужному процесорі STM32H753 та має систему потрійного резервування IMU. Два з трьох блоків датчиків мають внутрішню віброізоляцію, що критично для стабільного польоту планера при великих швидкостях. Вбудовані барометри забезпечують точне утримання висоти. Ціна: 450 USD.
- **Модуль навігації:** Here3+ Blue (RTK). Використовується для визначення координат у реальному часі та підтримує декілька супутникових систем. Наявність технології RTK дозволяє фіксувати координати центрів фотознімків з точністю до декількох сантиметрів, що є обов'язковим для професійної фотограмметрії. Ціна: 250 USD.
- **Радіовисотомір:** Benewake TF02-i Lidar. Лазерний далекомір, що вимірює точну відстань відносно поверхні землі. Необхідний для коректної роботи системи автоматичного приземлення та виконання маневру вирівнювання апарату безпосередньо перед контактом із землею. Ціна: 160 USD.
- **Датчик повітряної швидкості:** Matek ASPD-4525. Вимірює швидкість повітряного потоку, що обтікає крило. Це критично важливо для запобігання звалюванню літака при сильних поривах вітру та для коректної роботи автоматики в режимі польоту за маршрутом. Ціна: 60 USD.

3.2 Силова установка та механізація

- **Двигун:** T-Motor AT4120 KV450. Спеціалізований безколекторний мотор з низькою вагою та високим ККД. Оптимізований для виконання тривалих місій на низьких обертах, що дозволяє досягти цільового часу польоту понад 120 хвилин. Ціна: 115 USD USD.
- **Регулятор швидкості (ESC):** T-Motor Air 40A 6S. Керує потужністю та обертами двигуна. Налаштований на підтримку реверсу, що дозволяє

використовувати гвинт для активного аеродинамічного гальмування апарату під час фази приземлення. Ціна: 55 USD.

- **Складні гвинти:** T-Motor Folding Prop 14x10. Карбонові лопаті, що автоматично складаються вздовж фюзеляжу при вимкненні тяги. Це захищає вал двигуна та самі лопаті від пошкоджень під час посадки апарату на корпус. Ціна: 65 USD.
- **Сервоприводи:** MKS HV6130 (4 одиниці). Високоточні цифрові приводи з металевим редуктором для керування елеронами та рулями. Забезпечують миттєву реакцію та стабільність керування при великих аеродинамічних навантаженнях під час польоту за маршрутом. Ціна: 400 USD.

3.3 Енергозабезпечення та живлення

- **Акумуляторна збірка:** 6S6P Li-ion (Molicel 21700). Збірка ємністю 27 000 mAh. Елементи типу Li-ion мають значно більшу щільність енергії за Li-Po, що забезпечує автономність польоту до 2 годин. Розрахунок виконано з урахуванням 30% запасу ємності. Ціна: 380 USD.
- **Модуль розподілу живлення та ВЕС:** Mavid Power Module + Matek UBEC. Забезпечує перетворення напруги акумулятора у стабільні рівні для автопілота та датчиків, а також окреме силове живлення для сервоприводів. Ціна: 115 USD.

3.4 Цільове навантаження, захист та зв'язок

- **Камера:** Sony ILX-LR1 (об'єктив 35mm f/2.8). Повнокадрова матриця з роздільною здатністю 61 Мп. Встановлюється на внутрішні силіконові або пружинні демпфери для гасіння вібрацій фюзеляжу та захисту від ударів. Ціна: 3 850 USD.
- **Система захисту оптики:** Механічні шторки та демпфери. Автоматизовані шторки захищають лінзу від пилу та механічних пошкоджень під час посадки. Пасивна система вентиляції запобігає перегріву матриці під час тривалої роботи. Ціна: 150 USD.
- **Контролер спуску:** Seagull #MAP2. Інтерфейс для автоматичної синхронізації роботи автопілота та затвора камери. Забезпечує спрацювання камери точно в заданих точках маршруту із функцією зворотного зв'язку. Ціна: 60 USD.
- **Система зв'язку та телеметрії:** TBS Crossfire Diversity. Забезпечує надійний канал керування та передачу польотних даних на великі відстані. Використовує дві антени для стабільного сигналу незалежно від положення планера. Ціна: 110 USD.
- **Відеосистема:** Matek VTX + Foxeer. Аналогова система передачі відеосигналу в реальному часі (курсова камера). Дозволяє оператору візуально контролювати процес зльоту та обирати безпечне місце для автоматичного приземлення. Ціна: 120 USD.

3.5 Перевірка на сумісність (Compatibility Check)

- **Напруга:** Весь ланцюг (двигун, ESC, сервоприводи через BEC, польотник) розрахований на напругу 6S Li-ion. Це стандарт для професійних систем, що забезпечує стабільну роботу всіх модулів без перегріву.
- **Протоколи зв'язку:** Польотник Orange Cube+ ідеально працює з обраним приймачем TBS Crossfire через протокол CRSF та з GPS-модулем Here3+ через шину CAN, що гарантує високу швидкість обміну даними.

3.6 Підсумкова фінансова калькуляція елементів

- Автопілот та навігація (Orange Cube, GPS RTK): 700 USD.
- Система датчиків (Lidar, Airspeed): 220 USD.
- Силова установка (Motor, ESC, Props): 235 USD.
- Сервоприводи (MKS, 4 шт): 400 USD.
- Система живлення (Battery 6S6P, PM, UBEC): 495 USD.
- Камера та об'єктив (Sony 61Mp): 3 850 USD.
- Захист камери, демпфери та шторки: 150 USD.
- Зв'язок та відео (Crossfire, VTX, Camera): 230 USD.
- Контролер камери та аксесуари (антени, дроти): 160 USD.

Загальна вартість електронної складової: 6 440 USD.

Резерв на розробку та виготовлення планера: 3 560 USD.

4. Конструкція фюзеляжу та системи посадки

4.1 Матеріали та захист корпусу

Для забезпечення довговічності апарату при багатократному використанні та захисту високовартісного обладнання, конструкція фюзеляжу базується на використанні композитних матеріалів:

- **Нижня частина фюзеляжу:** Виконується у формі «санок» із композитного сендвічу для поглинання ударних навантажень.
- **Зовнішній шар:** Кевларове покриття, що забезпечує високу стійкість до стирання при посадці на ґрунт або траву.
- **Середній шар:** Демпферна піна для гасіння енергії удару та захисту внутрішніх вузлів.
- **Внутрішній каркас:** Карбоновий скелет для жорсткої фіксації камери та елементів живлення.

- **Віброізоляція:** Використання внутрішніх силіконових або пружинних віброзв'язків для кріплення камери з метою усунення впливу вібрацій на якість знімків.

4.2 Схеми та механізми приземлення

Для забезпечення безпечного повернення апарату та збереження оптичної системи реалізовано наступні технічні рішення:

- **Автоматичне приземлення:** Система базується на даних лазерного лідара для точного визначення висоти вирівнювання перед торканням поверхні.
- **Аеродинамічне гальмування:** Використання реверсу двигуна для активного гасіння швидкості на фінальному етапі посадки.
- **Захист пропелера:** Встановлення складного гвинта, лопаті якого автоматично притискаються до фюзеляжу після вимкнення тяги, що запобігає їх поломці.
- **Захист оптики:** Застосування механічних шторок, які автоматично закривають об'єктив камери перед посадкою для захисту від пилу та механічних пошкоджень.

4.3 Експлуатаційні характеристики

- **Транспортування:** Конструкція передбачає розбірне крило, що дозволяє перевозити БПЛА у багажнику легкового автомобіля.
- **Посадку «на пузо»:** Оптимізована форма фюзеляжу дозволяє виконувати приземлення на непідготовлені майданчики без використання додаткових шасі, що знижує вагу та вартість апарату.

4.4 Система наземного старту (Катапульта)

- Враховуючи злітну масу апарату (**7.4 кг**) та розрахункову тягоозброєність силової установки (**0.25**), для забезпечення безпечного відриву та запобігання звалюванню на етапі зльоту передбачено використання пускової установки рейкового типу.
- **Технічні характеристики та розрахунок енергії:**
- **Тип установки:** Розбірна алюмінієва рейка з гумовим або пневматичним приводом.
- **Довжина робочої рейки: 3 метри.** Це оптимальна дистанція для плавного прискорення без критичних перевантажень на фюзеляж та підвіс камери.
- **Цільова швидкість виходу: 55 км/год (15.3 м/с).** Це на 20% вище швидкості звалювання, що дає автопілоту запас керованості одразу після відриву.
- **Необхідне прискорення :** При довжині 3 м прискорення становитиме приблизно **39 м/с² (~4G)**.

- **Час розгону: 0.4 секунди.**
- **Конструктивні особливості:**
- **Каретка зі скиданням:** Літак встановлюється на спеціальну каретку, яка фіксує його під кутом $+10^{\circ}$.. $+12^{\circ}$ до горизонту. Після проходження всієї довжини рейки каретка автоматично зупиняється демпфером, а БПЛА продовжує політ по інерції.
- **Система натягу:** Використовується джгут із високоякісного латексу (терабанд) або пневматичний поршень. Сила натягу має забезпечувати пусковий імпульс, достатній для подолання інерції 7.4 кг.
- **Безпека:** Запуск здійснюється дистанційно за допомогою педального пускового механізму, що дозволяє оператору знаходитися на безпечній відстані від траєкторії руху апарату.
- **Обґрунтування вибору:**
- Застосування катапульты дозволяє відмовитися від шасі, що знижує вагу планера на **400–500 г** та суттєво зменшує аеродинамічний опір у польоті. Це є критично важливим для досягнення цільового часу польоту у **112–114 хвилин**.

5. Програмне забезпечення та алгоритми керування

Для реалізації автономного польоту та виконання завдань із фотограмметрії використовується комплекс програмних рішень, що забезпечують планування місії, контроль параметрів у реальному часі та обробку отриманих даних.

5.1 Наземна станція керування (GCS)

Для налаштування апарату та керування польотом використовується ПЗ Mission Planner або QGroundControl:

- **Планування місії:** Автоматична генерація «сітки» польоту над об'єктом із заданим відсотком перекриття кадрів (повздовжнє та поперечне).
- **Контроль телеметрії:** Відображення в реальному часі стану акумуляторів, повітряної швидкості, висоти за лідаром та якості зв'язку.
- **Геотегування:** Синхронізація логів автопілота з часом спрацювання затвора камери для точного вписування координат у метадані знімків (EXIF).

5.2 Автопілот та внутрішні алгоритми

Бортове ПЗ ArduPlane забезпечує роботу в наступних критичних режимах:

- **AUTO:** Повністю автономний політ за маршрутом із автоматичним керуванням камерою через контролер Seagull #MAP2.
- **CRUISE:** Напіваавтоматичний режим із утриманням курсу та висоти для стабілізації під час зйомки.

- **RTL (Return to Launch):** Автоматичне повернення в точку зльоту при втраті зв'язку або критичному розряді батареї.
- **Auto-land:** Алгоритм автоматичного приземлення, що використовує дані лазерного висотоміра для фінального вирівнювання (flare) перед посадкою на фюзеляж.

5.3 Попередній аналіз даних

Для перевірки якості зйомки безпосередньо в полі використовується ПЗ для швидкої зшивки (наприклад, Pix4Dcapture або Agisoft Metashape), що дозволяє переконатися у відсутності «білих плям» на карті до завершення виїзду.

6. Технічні розрахунки та льотно-технічні характеристики (ЛТХ)

6.1 Розрахунок масового бюджету

Для визначення необхідної підйомної сили проведено детальний розрахунок маси всіх складових частин БПЛА:

Компонент	Маса (г)	Обґрунтування
Камера Sony ILX-LR1 + об'єктив	600	Корпус 243 г + об'єктив Sony FE 35mm f/1.8 та кріплення.
Акумуляторна збірка 6S6P	2 550	На основі елементів Molicel 21700 (70 г/шт) + корпус та дроти.
Силова установка (мотор, ESC, гвинт)	445	T-Motor AT4120 KV450
Електроніка (Cube, Here3, VTX, серво)	450	Сумарна вага контролера, датчиків та приводів.
Планер (корпус, крила, хвіст)	3205	Розрахункова вага композитного корпусу з кевлару та карбону.
Захист камери та демпфери	200	Механічні шторки та вібророзв'язка.
Загальна злітна маса (MTOW)	7 400	Розрахунковий параметр для визначення навантаження на крило.

6.2 Геометричні та аеродинамічні характеристики

Для забезпечення стабільного польоту при масі 7.1 кг обрано наступну конфігурацію планера:

- **Тип крила:** Високоплан із несиметричним профілем (типу Clark Y або подібні) для забезпечення високої підйомної сили на крейсерських швидкостях.

- **Розмах крила:** 2.6 м (розбірне для транспортування в багажнику).
- **Площа крила:** 0.65 м².
- **Навантаження на крило:** 11,38 кг/м² (оптимальний показник для стабільного польоту та стійкості до вітру).

6.3 Робочі параметри та режими польоту

Виходячи з потужності двигуна (**статична тяга ~1.87 кг** на макс. обертах) та ємності АКБ:

- **Спосіб запуску:** Пуск із катапульти.
- **Крейсерська швидкість:** 65–77 км/год (найбільш енергоефективний режим).
- **Максимальна швидкість:** 110 км/год.
- **Швидкість звалювання:** 46,2 км/год.
- **Злітна швидкість:** 55 км/год.
- **Стеля польоту:** До 3800 м (обмежена якістю роботи двигуна, теплоізоляцією акумулятора. Для нашого випадку це не актуально, бо робоча висота камери значно нижча).
- **Час у повітрі:** 112-114 хвилин (з урахуванням 30% запасу енергії). При роботі на крейсерській швидкості, можливо підняти цей показник.

6.4 Розрахунок робочої висоти для фотограмметрії

Для камери 61 Мп (Sony ILX-LR1) при використанні об'єктива 35 мм:

- **Робоча висота:** 350–500 м.
- **GSD (роздільна здатність на землі):** При висоті 450 м складає приблизно 4.8 см/піксель. Це дозволяє створювати карти високої точності при мінімальній кількості проходів.

6.5 Система посадки

Приземлення здійснюється автоматично (Auto-land) у два етапи:

1. **Зниження за даними лідара:** Вимірювання відстані до поверхні з точністю до 1 см.
2. **Вирівнювання та реверс:** На висоті 1 м включається реверс двигуна для гасіння швидкості. Посадка відбувається на посиленій кевларом нижній сегмент фюзеляжу ("санки").

6.6 Розрахунок енергетичного балансу та тривалості польоту

Для точного визначення часу перебування в повітрі проведено аналіз споживання енергії кожним вузлом системи при напрузі живлення 22.2 В (6S).

А. Розрахунок енергоємності АКБ

Використовується збірка 6S6P на елементах Molicel 21700 (4500 mAh на елемент).

- Загальна ємність (Q): 6 паралельних гілок * 4.5 Аг = 27 Аг.
- Запас енергії (E): 22.2 В * 27 Аг = 599.4 Вт·год (округлено до 600 Вт·год).
- Корисна енергія (E_use): З урахуванням 30% резерву безпеки для збереження ресурсу Li-ion, використовуємо 70% ємності: 600 Вт·год * 0.7 = 420 Вт·год.

Б. Споживання бортової електроніки (Payload & Avionics)

Ці елементи споживають енергію постійно, незалежно від режиму польоту:

- Автопілот Orange Cube+, GPS, датчики: ~10 Вт.
- Камера Sony ILX-LR1 (у режимі серійної зйомки): ~4 Вт.
- Передавач відео та телеметрії (TBS Crossfire + VTX): ~7 Вт.
- Сервоприводи (середнє навантаження при стабілізації): ~5 Вт.
- **Сумарне постійне споживання (P_const):** 10 + 4 + 7 + 5 = 26 Вт.

В. Споживання силової установки (Cruising Power)

Це найголовніший показник — потужність, необхідна для підтримки горизонтального польоту на крейсерській швидкості ($V = 19.5$ м/с). Потужність розраховується через аеродинамічну якість планера (K), яка для нашої схеми становить приблизно 12:

- Необхідна тяга (T_{req}): Маса (7.4 кг) / Якість (12) = 0.617 кг тяги.
- Потужність на валу (P_{shaft}): (Тяга 0.617 кг * 9.81 * Швидкість 19.5 м/с) / ККД гвинта 0.7 = 168,6 Вт. (*Розрахунок проведено для середньої крейсерської швидкості 70 км/год*).
- Електрична потужність (P_{motor}): Потужність на валу / ККД мотора 0.85 = 189 Вт.

Г. Фінальний розрахунок часу польоту (T)

Загальна споживана потужність у крейсерському режимі:

$$P_{total} = P_{motor} + P_{const} = 189 \text{ Вт} + 26 \text{ Вт} = 223 \text{ Вт}.$$

Час польоту до резервного залишку 30%:

$$T = E_{use} / P_{total} = 420 \text{ Вт·год} / 223 \text{ Вт} = 1.87 \text{ години (приблизно 112-114 хвилин)}.$$

Висновок: Розрахунковий час у 112-114 хвилин при повному корисному навантаженні (камера 61 Мп) повністю задовольняє вимогу ТЗ "від 90 хвилин".

7. Розрахунок геометрії та масових характеристик планера

7.1 Розрахунок крила (Аеродинаміка)

Для польоту на швидкості 70 км/год із вагою 7.4 кг навантаження на крило при площі **0.65 м²** становить **11,38 кг/м²**, що є оптимальним показником для стабільного польоту та впевненого планування.

- **Розмах крила (Span):** 2600 мм (2.6 м). Вибрано для забезпечення високої аеродинамічної якості ($K \approx 12$).
- **Середня хорда (Chord):** 250 мм. Обчислено як $S / L = 0.65 / 2.6$
- **Тип профілю:** Несиметричний (типу Clark Y), товщиною 12% (30 мм). Даний профіль обрано за його високий коефіцієнт підйомної сили при низьких числах Рейнольдса та стабільний момент тангажу.
- **Конструкція:** Розбірне на 3 частини (центроплан 1000 мм та дві консолі по 800 мм) для транспортування в багажнику. З'єднання реалізовано за допомогою карбонових пеналів **12–14 мм**, що проходять крізь силові нервюри.

7.2 Розрахунок фюзеляжу (Корпусу)

Габарити корпусу диктуються габаритами камери Sony (100x74x42.5 мм) та АКБ 6S6P (приблизно 150x130x80 мм).

- **Довжина фюзеляжу:** 1450 мм (1.45 м). Обчислено за правилом: довжина ≈ 55 -60% від розмаху крила для поздовжньої стійкості.
- **Максимальна ширина:** 140 мм (дає запас 30 мм для вібророзв'язки камери).
- **Максимальна висота:** 150 мм (для вертикального розміщення камери об'єктивом вниз та шторок).

7.3 Матеріали та ваговий розрахунок структури

Для ваги порожнього планера у 3000 г ми використовуємо композитний "сендвіч":

Частина планера	Матеріал	Вага (г)	Обґрунтування
Центральна капсула	Кевлар (2 шари) + Склотканина	800	Захист від ударів при посадці на "пузо".
Хвостова балка	Карбонова трубка (діаметр 30 мм)	400	Жорсткість при мінімальній вазі.
Крила (ядро)	Екструдований пінополістирол (XPS)	900	Легка основа профілю крила.
Обшивка крил	Склотканина (позитивна формовка)	555	Забезпечення гладкості та жорсткості на кручення.

Частина планера	Матеріал	Вага (г)	Обґрунтування
Лонжерони	Карбонові рейки/трубки	300	Сприйняття згинальних навантажень.
Оперення (хвіст)	Сендвіч (бальза/карбон)	250	Зменшення інерції хвоста.
РАЗОМ		3205	

7.4. Компонівка та центрування (Center of Gravity)

Для забезпечення статичної стабільності та динамічної керованості БПЛА «Крила України» розрахунковий центр мас (ЦМ) встановлено на позначці 70-75 мм від передньої кромки крила, що відповідає 28% середньої аеродинамічної хорди (САХ).

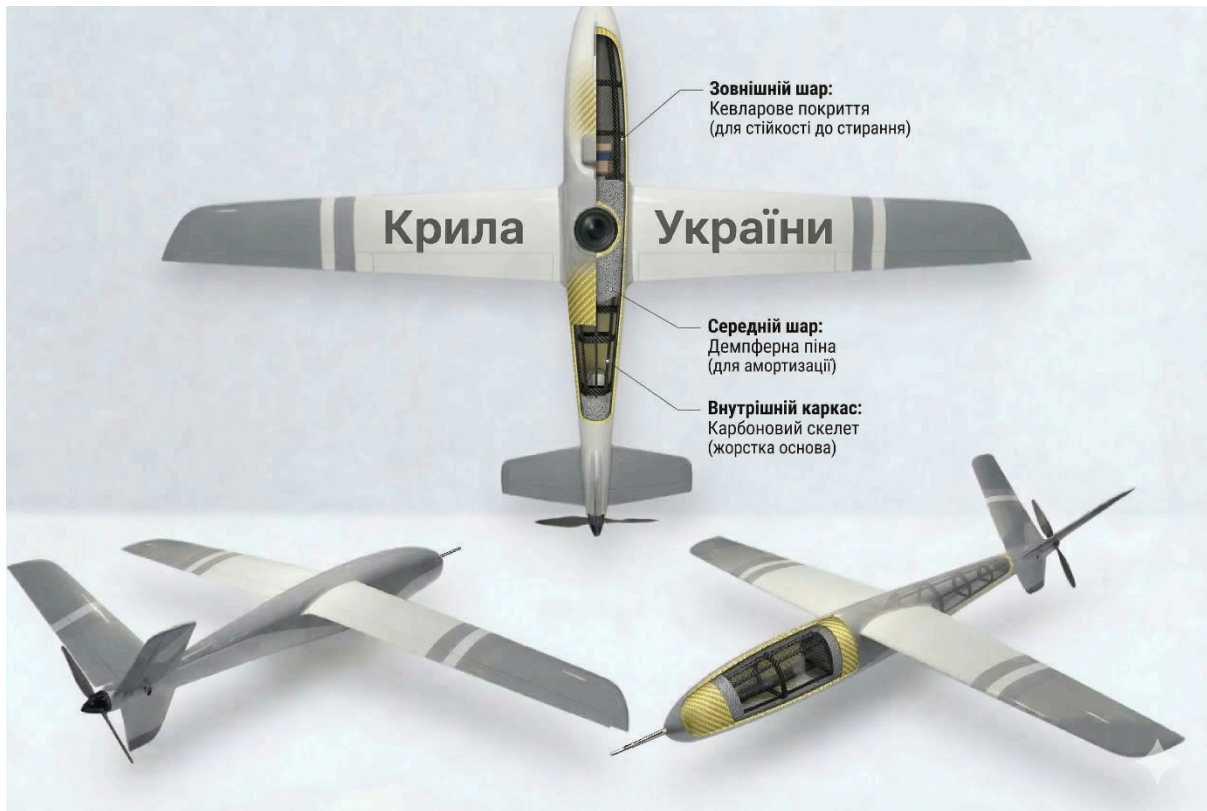
Розміщення основних компонентів всередині фюзеляжу довжиною 1450 мм реалізовано за наступною схемою:

- **Носова частина (0–400 мм):** Акумуляторний блок 6S6P (2.55 кг). Акумулятор виступає основним балансувальним компонентом системи. Завдяки збільшеній висоті фюзеляжу (150 мм), АКБ розміщується у верхній частині відсіку на спеціальній регульованій полиці. Це дозволяє здійснювати поздовжнє зміщення блоку для точного налаштування центрування при зміні об'єктів або встановленні додаткових датчиків.
- **Центральний відсік (400–550 мм):** Корисне навантаження. Промислова камера Sony ILX-LR1 з об'єктивом встановлюється на демпферній вібророзв'язці безпосередньо під лонжероном крила (у зоні центру тиску). Таке розташування мінімізує вплив маси камери на загальне центрування апарата при її монтажі/демонтажі та забезпечує ідеальний надирний ракурс зйомки.
- **Середня частина:** Відсік авіоніки та електроніки. Політний контролер Orange Cube+ та модуль GPS розміщуються на окремій платформі над камерою. Дане розташування забезпечує максимальне віддалення датчиків від силових кабелів двигуна, що мінімізує ризик виникнення електромагнітних завад на компас та магнітометр.
- **Хвостова частина:** Силова установка та керування. Електродвигун встановлюється за схемою з «штовхаючим» гвинтом на кінці хвостової балки. Сервоприводи V-подібного оперення інтегровані безпосередньо в хвостову секцію, що дозволяє використовувати короткі жорсткі тяги для прецизійного керування рулями.

Висновки по компоновці: Застосування камери Sony ILX-LR1 замість важчих аналогів дозволило змістити фокус мас ближче до центру тиску. Це суттєво зменшує

момент інерції БПЛА за тангажем, підвищуючи стабільність роботи автопілота в турбулентних умовах та знижуючи енерговитрати на стабілізацію польоту.

Зображення нашого БПЛА:





8. Висновки

У ході розробки аванпроєкту було обґрунтовано створення БПЛА літакового типу для завдань фотограмметрії. Основними досягненнями проєкту є:

- **Економічна ефективність:** Загальна вартість електронної складової становить 6 440 USD , що разом із витратами на планер дозволяє вписатися в бюджет до 10 000 USD. Це у 2-3 рази дешевше за закордонні аналоги при збереженні високої якості знімання.
- **Висока продуктивність:** Завдяки використанню промислової камери Sony ILX-LR1 з роздільною здатністю 61 Мп та розрахунковому часу польоту близько 112-114 хвилин , апарат здатний охоплювати площі від 400 га за один виліт.
- **Технічна досконалість:** Використання 6S Li-іон архітектури та системи навігації з підтримкою RTK забезпечує високу точність позиціонування центрів знімків (до декількох сантиметрів) та надійність силової установки.
- **Експлуатаційна живучість:** Захист дорогої оптики за допомогою механічних шторок та використання кевларового покриття фюзеляжу дозволяють здійснювати безпечну посадку на непідготовлені майданчики.

Даний проєкт є комерційно привабливим та технічно реалізованим рішенням, що займає вільну нішу між аматорськими та дорогими професійними системами.

9. Список використаних джерел та інструментів

1. eCalc — propCalc: <https://www.ecalc.ch/propcalc.php> — Універсальний онлайн-калькулятор для розрахунку тяги, струму та ККД силової установки.
2. ArduPlane Documentation: <https://ardupilot.org/plane/index.html> — Офіційна база знань щодо налаштування автопілота ArduPilot та режимів автономного польоту (AUTO, RTL, Auto-land).
3. Sony ILX-LR1 Technical Specifications: https://pro.sony/en_GB/products/interchangeable-lens-cameras/ilx-lr1 — Технічні дані та характеристики матриці 61 Мп для інтеграції в БПЛА.
4. Molicel 21700 P45B Datasheet: <https://www.molicel.com/products-applications/explore-by-product/> — Специфікація акумуляторних елементів для розрахунку енергоємності 6S6P збірки.
5. Airfoil Tools: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=clarky-il> — Дані аеродинамічного профілю Clark Y, що використані для розрахунку підйомної сили та навантаження на крило.
6. Pix4D GSD Calculator: <https://www.pix4d.com/gsd-calculator/> — Інструмент для розрахунку роздільної здатності на землі (GSD) та планування висоти фотограмметричної зйомки.