

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій і технічного захисту інформації  
(повна назва)

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Архітектурне проєктування FPV-квадрокоптера з інтегрованими  
системами автонаведення та скидання боєприпасу на базі AI  
(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи АПСм-22-1

Астапєєв Д.С.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 126 Інформаційні системи  
та технології

(код і повна назва спеціальності)

Освітня програма Архітектурне проєктування  
інформаційних систем

(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Дудка О.О.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

В.о. зав. кафедри

\_\_\_\_\_ (підпис)

Зарудний О. А.

(прізвище, ініціали)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій і технічного захисту інформації

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології  
(код і повна назва)

Освітня програма Архітектурне проектування інформаційних систем  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Астапєєву Денису Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Архітектурне проектування FPV-квадрокоптера з інтегрованими системами автонаведення та скидання боєприпасу на базі AI

затверджена наказом по університету від **3 жовтня 2023 р. № 1295 Ст**

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії **10 січня 2024 р.**

3. Вихідні дані до роботи створити архітектуру FPV-квадрокоптера з інтегрованими системами автонаведення та скидання боєприпасу з реалізацією прототипів

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1) Огляд аналогів наявних архітектурних рішень

2) Архітектурне проектування методом АТАМ

3) Опис архітектури за методом 4+1

4) Реалізація системи скидання

5) Реалізація системи автонаведення

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)\_\_\_\_\_

Комп'ютерна презентація

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина			

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір теми кваліфікаційної роботи	03.09.2023	
2	Затвердження плану і завдання кваліфікаційної роботи	03.10.2023	
3	Аналіз завдання, пошук та аналіз літературних джерел за темою роботи	20.11.2023	
4	Оформлення пояснювальної записки	29.12.2023	
5	Задача на перевірку та підпис кваліфікаційної роботи керівнику	10.01.2024	

Дата видачі завдання **4 жовтня 2023 р.**

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Астапєєв Д.С \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доцент каф. РТІКС Дудка О.О.  
(посада, прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 88 с. , 47 рисунків, джерел 35.

### FPV, КВАДРОКОПТЕР, АРХІТЕКТУРА, СИСТЕМА, АВТОНАВЕДЕННЯ, СКИДАННЯ.

Об'єктом розробки є архітектура FPV-квадрокоптера з інтегрованими системами автонаведення та скидання боєприпасу.

Предмет розробки – системи автонаведення та скидання боєприпасу.

Мета роботи – розроблення прототипів, які реалізують описані архітектурні рішення зв'язані з FPV-квадрокоптером та його інтегрованих систем.

У процесі роботи було створено архітектурне бачення з документуванням та реалізації прототипів на базі розробленої архітектури. Представлено архітектуру FPV-квадрокоптера з інтегрованими системами. Також представлена архітектура системи скидання боєприпасу на різних рівнях. На базі документації було реалізовано прототип системи скидання, який був створений за рахунок моделювання та адаптацію під визначену раму. Для системи автонаведення було прийняте рішення створювати FPV-симулятора для створення тестових даних для навчання системи автонаведення в різних локаціях та різних ситуаціях.

## ABSTRACT

Explanatory note: 93 p. , 47 figs. , 35 sources.

### FPV, QUADROCOPTER, ARCHITECTURE, SYSTEM, AUTOGUIDE, RESET.

The object of development is the architecture of an FPV quadcopter with integrated auto-guidance and ammunition drop systems.

The subject of development is auto-guidance and ammunition drop systems.

The purpose of the work is to develop prototypes that implement the described architectural solutions related to the FPV quadcopter and its integrated systems.

As part of the work, an architectural vision was created with documentation and implementation of prototypes based on the developed architecture. The architecture of an FPV quadcopter with integrated systems is presented. The architecture of the ammunition drop system at different levels is also presented. Based on the documentation, a prototype of the reset system was implemented, which was created due to modeling and adaptation to the specified frame. For the auto-guidance system, it was decided to create an FPV simulator to generate test data to train the auto-guidance system in different locations and situations.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ .....	7
ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД АНАЛОГІВ НАЯВНИХ АРХІТЕКТУРНИХ РІШЕНЬ .....	10
1.1 Актуальність FPV-квадрокоптера .....	10
1.2 Наявні архітектурні рішення FPV-квадрокоптера.....	11
1.3 Наявні архітектурні рішення системи скидання боєприпасу .....	13
1.4 Наявні архітектурні рішення автонаведення FPV-квадрокоптера. ....	16
1.5 Загальний опис майбутньої архітектури FPV-квадрокотеру .....	17
2 АРХІТЕКТУРНЕ ПРОЄКТУВАННЯ МЕТОДОМ АТАМ .....	22
2.1 Метод компромісного аналізу архітектури АТАМ .....	22
2.2 Стейкхолдери системи їх цілі та зацікавленість у системі.....	23
2.3 Функціональні вимоги .....	24
2.4 Обмеження системи .....	27
2.5 Атрибути якості системи для FPV-квадрокоптера.....	27
2.6 Атрибути якості для системи скидання боєприпасу .....	29
2.7 Атрибути якості для системи автонаведення .....	31
3 ОПИС АРХІТЕКТУРИ ЗА МЕТОДОМ 4+1 .....	34
3.1 Модель архітектурного вигляду 4+1 .....	34
3.2 Логічна архітектура системи .....	35
3.3 Архітектура розробки FPV-квадрокоптера.....	36
3.4 Архітектура розробки системи скидання та системи автонаведення..	38
3.4 Архітектура процесу системи.....	40
3.5 Фізична архітектура FPV-квадрокоптера.....	41
4 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ СКИДАННЯ .....	49
4.1 Моделювання та адаптування механічної частини системи скидання.....	49
4.2 Технічний стек системи скиду .....	53
4.3 Реалізація тестування системи скиду .....	55
5 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОНАВЕДЕННЯ .....	57

5.1 Технічний стек системи автонаведення.....	57
5.2 Опис компонентів FPV-симулятора для системи автонаведення .....	58
5.3 Розробка FPV-квадрокоптера у FPV-симуляторі .....	60
5.4 Розробка контролю FPV-квадрокоптеру у FPV-симуляторі .....	61
5.5 Розробка ІШ для техніки у FPV-симуляторі.....	63
5.6 Розробка головного меню та UI .....	66
ВИСНОВКИ.....	71
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	73
ДОДАТОК А .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ДОДАТОК Б .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ДОДАТОК В .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

- БМП – Бойова машина піхоти;
- БТР – Бронетранспортер;
- РЕБ – Радіоелектронна боротьба;
- КПП – коробка перемикання передач;
- ШІ – Штучний інтелект;
- ШИМ – Широтно імпульсна модуляція;
- АТАМ – Architecture Tradeoff Analysis Method;
- ДІ – Dajiang Innovation Technology;
- FPV – first person view;
- SEI – Software Engineering Institute
- ELRS – Express Long Range System;
- UI – User interface;
- UE5 – Unreal Engine 5;
- IDE – Integrated Development Environment;
- HUD – Head-Up Display;
- RC – Radio-Controlled.

## ВСТУП

Створення будь-якої архітектури це послідовний процес де архітектор повинен оцінювати усі можливі фактори при проєктуванні системи та шукати рішення серед безліч компромісів, які в результаті повинні задовольнити замовників проєкту та людей, які будуть його розробляти.

Оскільки поточне завдання складається з декількох інтегрованих систем до квадрокоптеру, то вміння шукати рішення серед безліч компромісів досить сильно знадобиться. Першою інтегрованою системою є система автонаведення на базі штучного інтелекту. Ця система повинна підняти відсоток ураження ворожого об'єкту. Другою інтегрованою системою є система скидання боєприпасу для FPV-квадрокоптеру. Головною метою обох систем є збільшити універсальність застосування FPV-квадрокоптеру.

Для реалізації поточних завдання будуть використовуватись два методи архітектурного аналізу та документування. Перший з яких АТАМ, що у розшифруванні звучить як метод компромісного аналізу. Метод використовують для зменшення ризику на початку життєвого циклу розробки програмного забезпечення. Мета цього методу вибрати відповідну архітектуру для системи шляхом виявлення компромісів і чутливих моментів системи. Другим методом є 4+1, який описує архітектуру системи на основі використання кількох поглядів. Подання використовується для опису системи з кількох точок зору.

Звіт розробленої кваліфікаційної роботи, буде містити

У першому розділі будуть описуватися огляд аналогічних архітектурних рішень для FPV-квадрокоптеру та його підсистем в ролі системи скидання боєприпасу та системи автонаведення в результаті буде сформований опис майбутньої архітектури FPV-квадрокоптеру.

Другий розділ буде націлений на архітектурне проєктування методом АТАМ він буде описувати всі підсистеми під призмою свого методу. Також будуть виведені атрибути якості для кожної системи.

Третій розділ буде також присвячений архітектурному проєктуванню за методом 4+1. У цьому розділі буде описана модель проєктної частини, за якою буде відбуватись розробка систем. В кінці розділу буде представлена фізична модель за якою буде відбуватись збірка.

У четвертому розділі буде описуватись реалізація системи скидання. Першим кроком буде створювання та моделювання з адаптацією механічної частини системи скидання. Також буде описане тестування системи скидання.

П'ятий розділ буде стосуватись реалізації системи автонаведення де буде відбуватись опис створення FPV-симулятора для системи автонаведення. Це потрібно для створення тестових даних для ШІ.

# 1 ОГЛЯД АНАЛОГІВ НАЯВНИХ АРХІТЕКТУРНИХ РІШЕНЬ

## 1.1 Актуальність FPV-квадрокоптеру

FPV-квадрокоптери, або квадрокоптери з першою особою стали неабияко актуальними в сучасному світі. Їх популярність стрімко зростає завдяки низці застосувань, які вони відкривають. Ці безпілотники не лише стали найбільш споживаними в сфері розваг та розважальних заходів, але й знайшли важливе застосування у різних сферах життя таких як відеозйомка та військове застосування.

Завдяки FPV-квадрокоптерам, ми маємо можливість буквально зануритися в іншу реальність, відчутти себе пілотом на висоті, або спостерігачем з пташиного польоту. Вони стали незамінним інструментом для любителів адреналіну, для тих, хто шукає найнеймовірніші відчуття та бажає побачити світ з висоти пташиного польоту, не виходячи з власного будинку.

З іншого боку, FPV-квадрокоптери мають важливе застосування в професійних галузях, таких як аграрний сектор, рятувальні операції, кіноіндустрія, моніторинг та дослідження. Вони надають можливість отримувати унікальні знімки та відеозаписи, які раніше були недосяжні або дуже витратні для отримання. FPV-квадрокоптери можуть безпечно долати важкодоступні місця, а також використовуватися для спостереження в режимі реального часу.

У світі технологій і інновацій FPV-квадрокоптери продовжують еволюціонувати, отримуючи нові функції та можливості. Вони стають доступнішими і дружніми до користувача, завдяки чому все більше людей може відкрити для себе цей захоплюючий світ.

В цьому контексті актуальність FPV-квадрокоптерів стає очевидною, і вони надають можливість нам зануритися в неймовірний світ польоту та

відкривати нові перспективи у сферах розваг, навчання, професійного використання та досліджень.

На рисунку 1.1 зображено приклад FPV-квадрокоптеру без акумулятору.



Рисунок 1.1 – FPV-квадрокоптер без акумулятору

Загалом, FPV-квадрокоптери змінюють наше бачення світу та відкривають нові можливості у різних аспектах нашого життя. Вони не лише актуальні, але і важливі для сучасного суспільства, сприяючи розвитку технологій, креативності та інновацій.

## 1.2 Наявні архітектурні рішення FPV-квадрокоптеру

FPV-квадрокоптер - це безпілотний літальний апарат, який обладнаний камерою та системою передачі відеосигналу, щоб пілот міг спостерігати за польотами в реальному часі через відеографічний окуляр або екран. Існують різні архітектурні рішення для FPV-квадрокоптерів, які варіюються залежно від потреб користувача та бюджету.

Архітектура FPV-квадрокоптеру включає у себе:

-вибір матеріалу та конструкції дрону, яка впливає на міцність і легкість FPV-квадрокоптера. Зазвичай використовуються карбонові волокна для легкості та міцності.

-вибір кількості моторів впливає на максимальне споживання усього квадрокоптеру та кінцеву вагопідйомність рішення. Разом з вибором розміру квадрокоптеру та кількості моторів обирається потрібний розмір пропеллера для кращої тяги кожного двигуна. Також до моторів обирається контролер швидкостей моторів.

-від обрання кількості моторів залежить обрання польотного контролеру. Польотний контролер - це спеціалізований мікроконтролер, який використовується для управління рухами квадрокоптером або будь-яким іншими безпілотним апаратом.

-вибір трансмітеру та приймача. Основною різницею на цьому елементі є підтримка різних протоколів передачі даних від яких залежить дальність роботи квадрокоптеру.

-вибір FPV-камери та передавача. FPV-камера та передавач відеосигналу дозволяють пілоту бачити зображення в реальному часі. Це може бути аналогова система передачі або цифрова система.

-вибір акумулятора та плати розгалуження живлення впливає на час польоту та потужність квадрокоптера. Зазвичай підбирають під наявні двигуни та їх потужність[1].

На рисунку 1.2 зображена універсальна архітектура квадрокоптеру

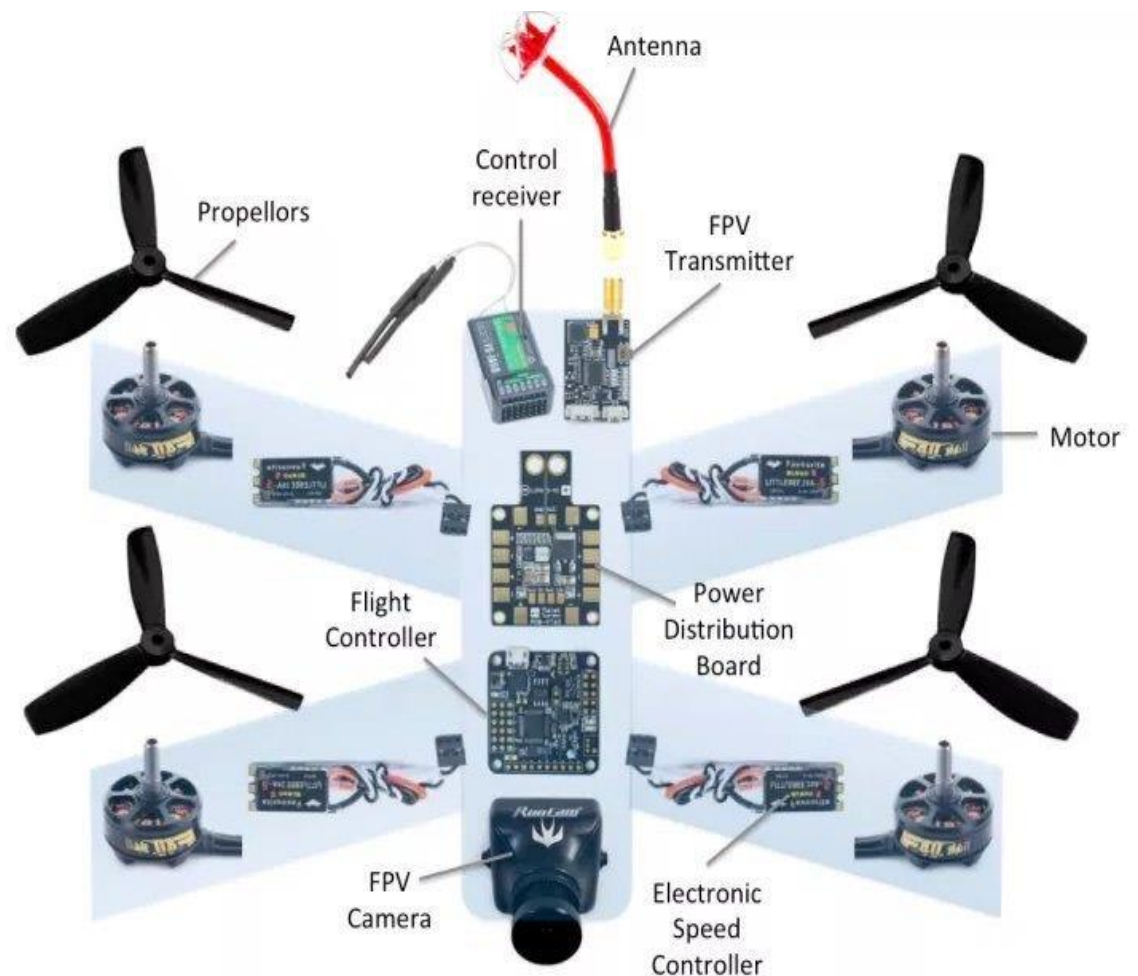


Рисунок 1.2 – Універсальна архітектура FPV-квадрокоптеру

Ці архітектурні рішення можуть бути адаптовані та налаштовані залежно від конкретних потреб пілота та зони застосування того чи іншого FPV-квадрокоптеру.

### 1.3 Наявні архітектурні рішення системи скидання боєприпасу

Система скидання для безпілотних апаратів, прийшла з цивільних дронів, а саме DJI Mavic. Ідея виникла у скиданні прикормки для риби при рибальстві. Після цього використання набуло різних напрямків, як і цивільних так і військових. Через те що квадрокоптери не були реалізовані для таких систем, рішення було досить неординарним. Система будувалась на взаємодії через лед-діод та фоторезистора. Пілот має змогу через

трансмiтер керувати діодом. При ввімкненi діода, фоторезистор зчитує змiнення стану та передає iнформацiю до мiкроконтролера, який акумулює роботу серводвигуна для вiдкриття клем, якi тримають той чи iнший предмет. На рисунку 1.3 зображено схематичне архiтектурне представлення системи скиду Autel Evo 2.

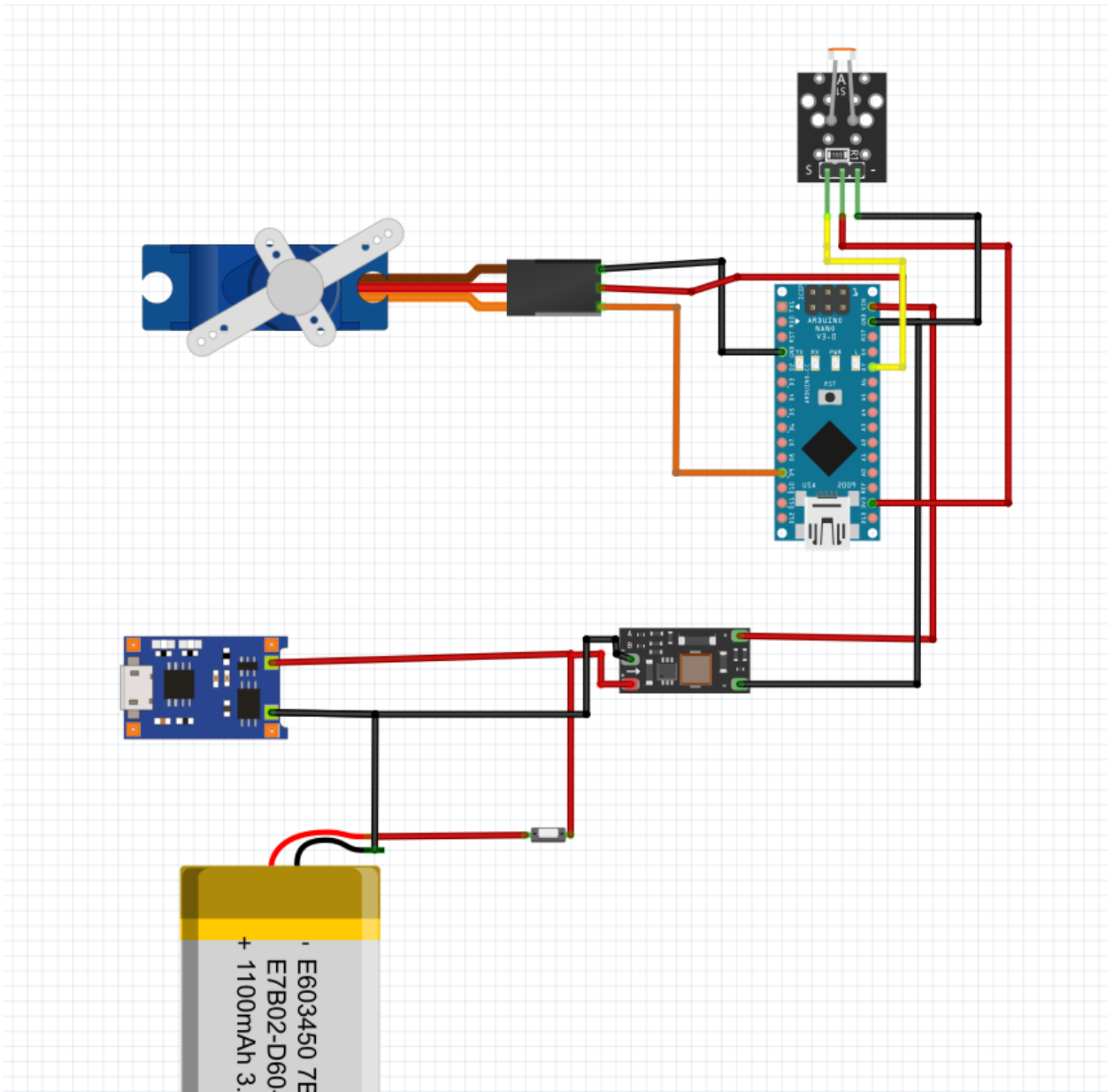


Рисунок 1.3 - Схематичне архiтектурне представлення системи скиду

До загального концепту взаємодiї фоторезистора та лед-дiоду квадрокоптеру додається плата збiльшення напруги sx1308 для забезпечення

потрібної напруги для серводвигуна. Вона може варіюватись від 5 до 7v. Також додається плата tp4056 для підзарядки акумулятора.

На рисунку 1.4 зображений приклад вигляду системи скиду Autel Evo 2 [2].



Рисунок 1.4 – Система скиду Autel Evo 2

Проблема такого підходу складається з того, що якщо корпус скиду не буде прилягати тісно до квадрокоптеру, то можуть створюватись засвіти, через що система може спрацьовувати невчасно або випадково.

Якщо розглядати військовий аспект то система скиду майже ніяк не еволюціонувала окрім як видозмінення форми скиду для покращення взаємодії між системою скиду та самим квадрокоптером. Також було покращено форму для кращого фіксування боєприпасу.

Зазвичай використовують цивільний DJI Mavic для скидання гранати або вога. Проблема такого підходу полягає у тому, що цивільні безпілотики є дорогими, і їх краще використовувати для розвідки. Використання FPV, може знизити ціну питання скиду та оптимізувати взаємодію між квадрокоптером та системою скиду.

#### 1.4 Наявні архітектурні рішення автонаведення FPV-квадрокоптеру

Система автонаведення немає аналогів на момент написання цієї роботи. Є відносно схожа система, яка може бути використана для розробки наявної ідеї. Такою системою є слідування дрону за об'єктом. Зазвичай цю технологію використовують для того, щоб дрон можна було налаштувати так, щоб він автоматично слідував за людиною (або іншим об'єктом) і фіксував її рухи. Вона забезпечує стабільну та плавну роботу квадрокоптера, який слідує за об'єктом, і надає можливість створити захоплюючі відеозйомки. Тобто ця система визначає потрібний об'єкт та спрямовує дрон за напрямом цього об'єкту. Цей підхід об'єднує у собі дві важливі функції для автонаведення. Перша функція це визначення та захоплення об'єкту за яким потрібно прямувати. Друга функція це керування дроном в сторону об'єкта який був захоплений [3]. На рисунку 1.5 зображено схему роботи системи слідування за об'єктом.

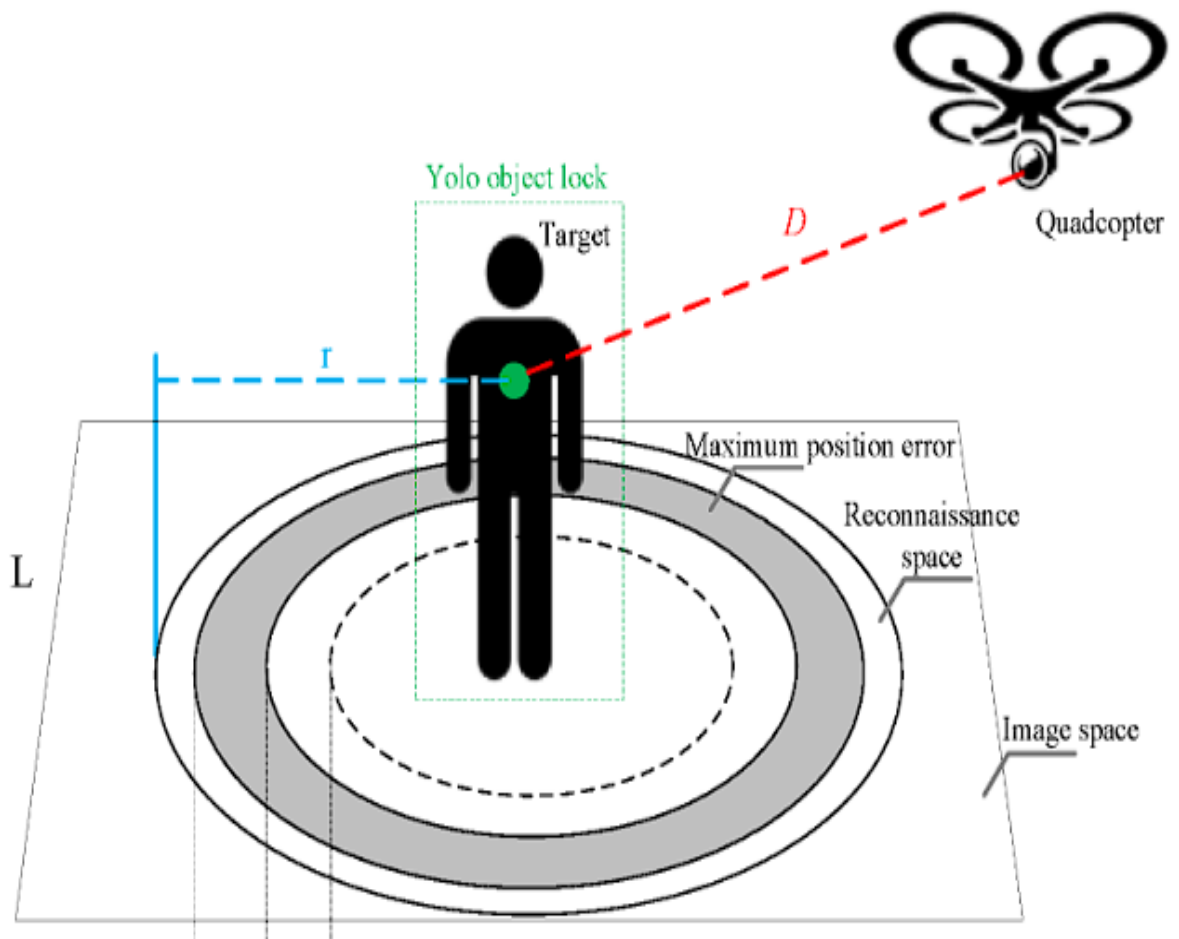


Рисунок 1.5 – Схема роботи системи слідування за об'єктом

На рисунку 1.4 можна побачити, що система також забезпечує оптимальну дистанцію між об'єктом захоплення та самим дроном для створення кращих кадрів.

### 1.5 Загальний опис майбутньої архітектури FPV-квадрокоптеру

В загальному майбутня архітектура FPV-квадрокоптеру може піти різними шляхами. Тут буде описана саме архітектура, яка націлена на застосування у війську. На цю мить є два шляхи за якими може піти покращення FPV-квадрокоптеру.

Перший шлях це створення різних видів FPV-квадрокоптерів, які будуть виконувати виключно специфічні задачі з максимальною корисною дією.

Наприклад FPV-квадрокоптер, який буде нести виключно один тип снаряда, але його комплектація і система, будуть повністю підходити під цей тип снаряду. Такий тип дрону було нещодавно представлено, який може підняти у повітря ТМ-62[4]. ТМ-62 це радянська протитанкова міна, яка важить 7.5 кг. В той час як дрони зі скидом працюють зі снарядом ВОГ-17[5] або звичайною РГД-5[6] гранатою, вага яких 300 грам. Тобто на даний момент вже вимальовується класифікація дронів за вагопідйомністю, але це не означає, що дрони з малою вагопідйомністю заміняться дронами з більшою вагопідйомністю. Основним мінусом дрону, який може підіймати у повітря більшу вагопідйомність це те що він стає великим, і його легше помітити та уразити.

Другий шлях це створення універсального типу, який може використовуватись при найбільшій варіації різних боєприпасів та також забезпечувати ширший діапазон використання. Наприклад якщо розглядати FPV-квадрокоптер, то він працює з протитанковим снарядом різного калібру, який важить 3кг, але для ураження пілот квадрокоптеру, повинен спрямувати дрон у ціль. Ситуації з ураженню можуть бути різні, а саме:

- ураження динамічної військової техніки;
- ураження живої сили;
- ураження статичної техніки;
- ураження живої сили у захисних спорудах.

При ураженні динамічної військової техніки та ураження живої сили у різних захисних спорудах, безумовно краще влітати дроном у ціль для підвищення точності та збільшення відсотку ураження. Для статичної техніки та ураження живої сили на відкритій позиції кращим варіантом може бути скид з поверненням дрону назад для перезаряджання. Це може скоротити потреби у кількості FPV-квадрокоптерів та оптимізувати їх використання для пілотів. Також під універсальний тип архітектури FPV-квадрокоптеру може чудово підійти інтегрована система автонаведення, яка повинна збільшити відсоток успішного ураження. Ця система є досить

складною у реалізації через класифікацію різноманітної військової техніки. Ураження танка повинно відбуватись в визначену частину танку де броня є найслабшою[7]. На рисунку 1.6 зображено зони зеленого кольору куди в кращому випадку повинен потрапляти FPV-квадрокоптер.

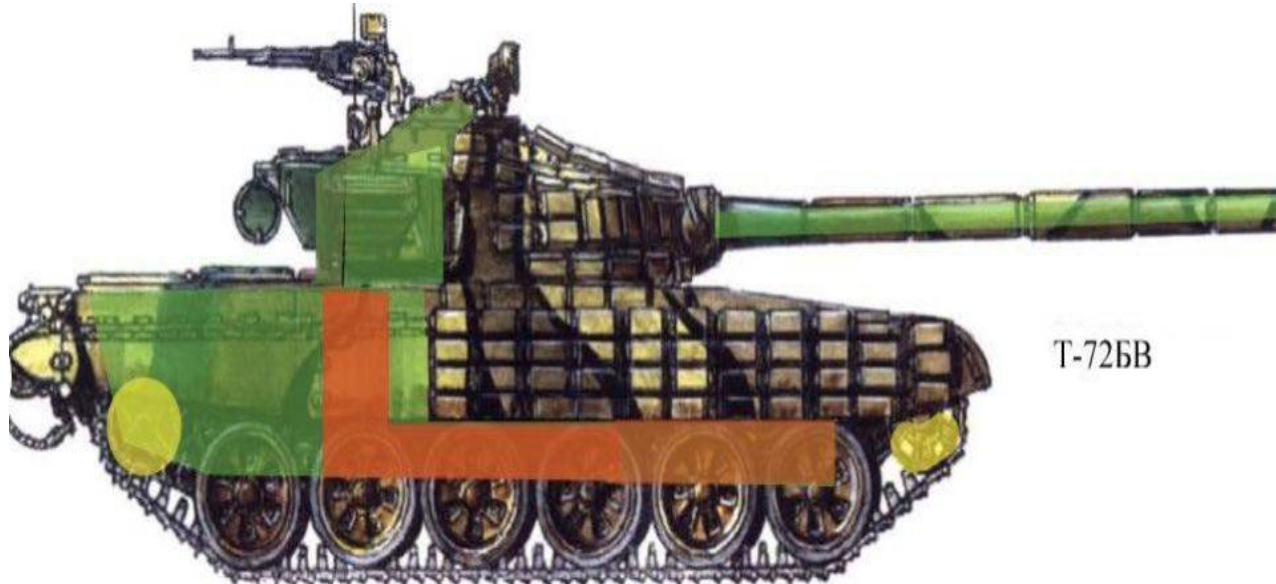


Рисунок 1.6 – Вразливі місця танку Т-72БВ

Якщо квадрокоптер не попадає у визначені зони, то екіпаж зазвичай може отримати контузію та переляк, але вірогідність виводу з ладу техніки падає. Якщо розглядати броньовану техніку на рівень нижче, такі як БМП та БТР, то ураження такої техніки є більшою варіативністю та уразити можна майже в усі частини які є. На рисунку 1.7 буде зображено БТР з вразливими місцями позначеними червоним кольором.

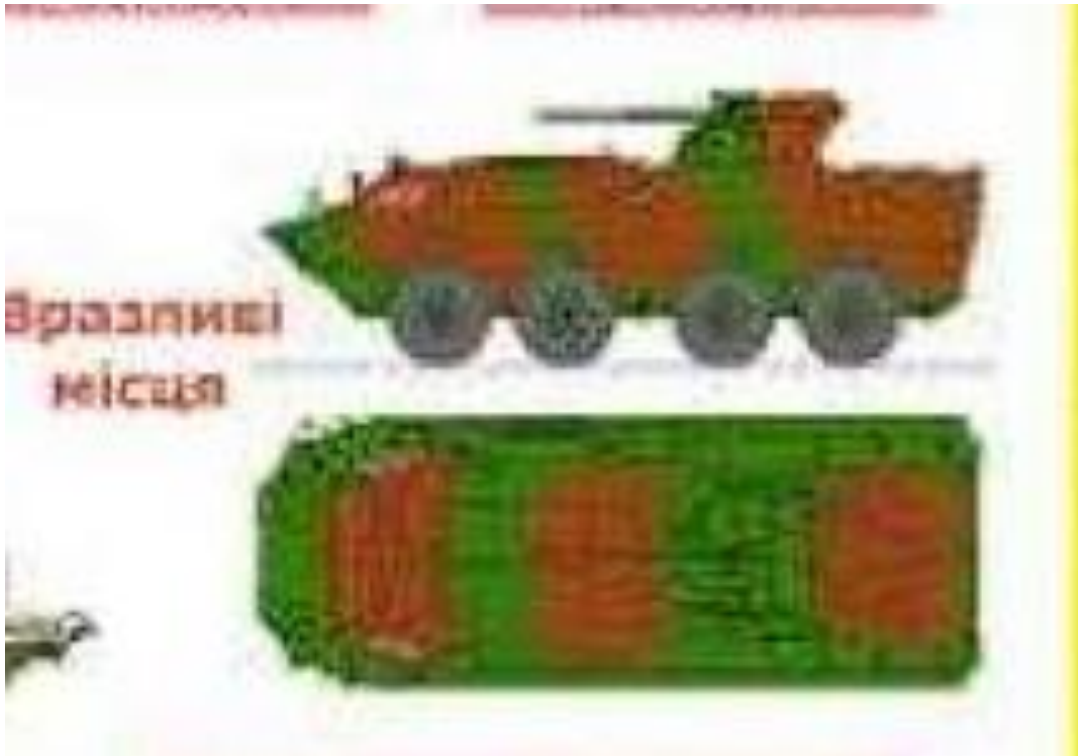


Рисунок 1.7 – Вразливі місця БТР

Якщо розглядати не броньовану техніку, то ураження та вивід з ладу цієї техніки може бути через попадання поруч. Тобто в таких випадках можна використовувати систему скиду навіть якщо техніка перебуває у динамічному стані.

Також система наведення може бути дуже корисна на останній стадії польоту FPV-квадрокоптеру у ціль. Чим нижче будь-який квадрокоптер або дрон тим слабше з ним зв'язок, тим гірше картина, яка передається до пілота. На це можуть ще впливати ландшафтні особливості цієї чи іншої позиції. Наприклад за останній час техніку почали зберігати у низинах де радіозв'язок гірше і ураження FPV-квадрокоптерами ускладнено. Зазвичай останні дві секунди польоту дрону відбуваються за інерцію без контролювання, через втрату зв'язку. На рисунку 1.8 зображено останній кадр, який бачить пілот після втрати зв'язку.

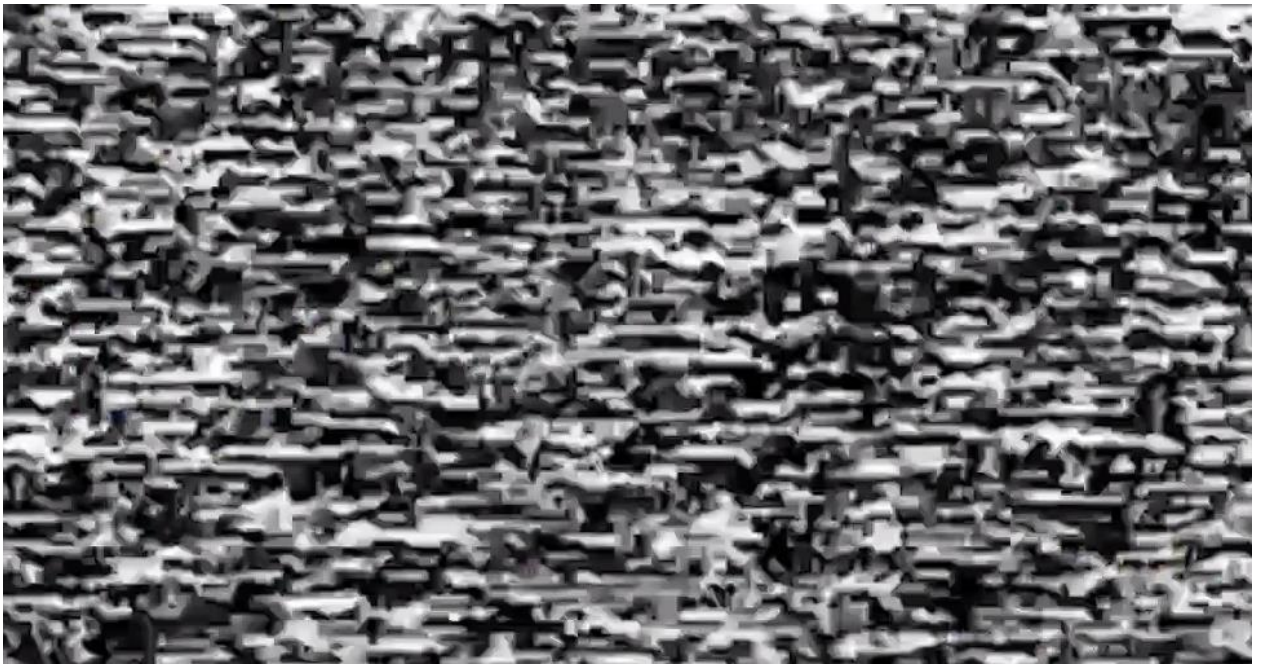


Рисунок 1.8 – Останній кадр після втрати зв'язку з FPV-дроном

Тому пілот повинен спрямувати квадрокоптер з урахуванням інерції та напрямку техніки, щоб її уразити. В ці останні секунди керування FPV-квадрокоптером система автонаведення може бути найбільш важливою у застосуванні [8].

## 2 АРХІТЕКТУРНЕ ПРОЄКТУВАННЯ МЕТОДОМ АТАМ

### 2.1 Метод компромісного аналізу архітектури АТАМ

Метод компромісного аналізу архітектури - це процес оцінки архітектури програмного забезпечення, який був розроблений Software Engineering Institute (SEI) на Карнегі-Мелонському університеті. АТАМ допомагає інженерам програмного забезпечення та архітекторам провести оцінку архітектури, ідентифікувати проблеми та вибрати оптимальний варіант архітектури для конкретного проєкту. Основною метою АТАМ є забезпечення балансу між функціональністю, якістю та іншими аспектами архітектури, а також прийняття обґрунтованих рішень щодо архітектури системи, такими як продуктивність, масштабованість, безпека та інші, і приймати обґрунтоване рішення щодо архітектури системи.

Основні етапи АТАМ включають:

- метод презентується зацікавленим сторонам та описується;
- керівник проєкту характеризує бізнес-цілі, які спонукають до розробки;
- створення дерева атрибутів якості;
- аналіз архітектурних підходів на основі високопріоритетних факторів, визначених на дереві атрибутів якості, вході цього етапу отримуються архітектурні ризики та точки чутливості та точки компромісу;
- проведення мозкового штурму та отримання пріоритетних сценаріїв де на основі типових сценаріїв будуть взяті за основу;
- після останнього кроку потрібно повторно проаналізувати архітектурні підходи завдяки тестовим сценаріям можна виявити додаткові архітектурні підходи та ризики. Також точки чутливості та компроміси, які потім ретельно документуються.
- презентування результатів на основі інформації зібраної за допомогою АТАМ та представлення результату зацікавленим сторонам [9];

На рисунку 2.1 зображена загальна схема дії методу ATAM

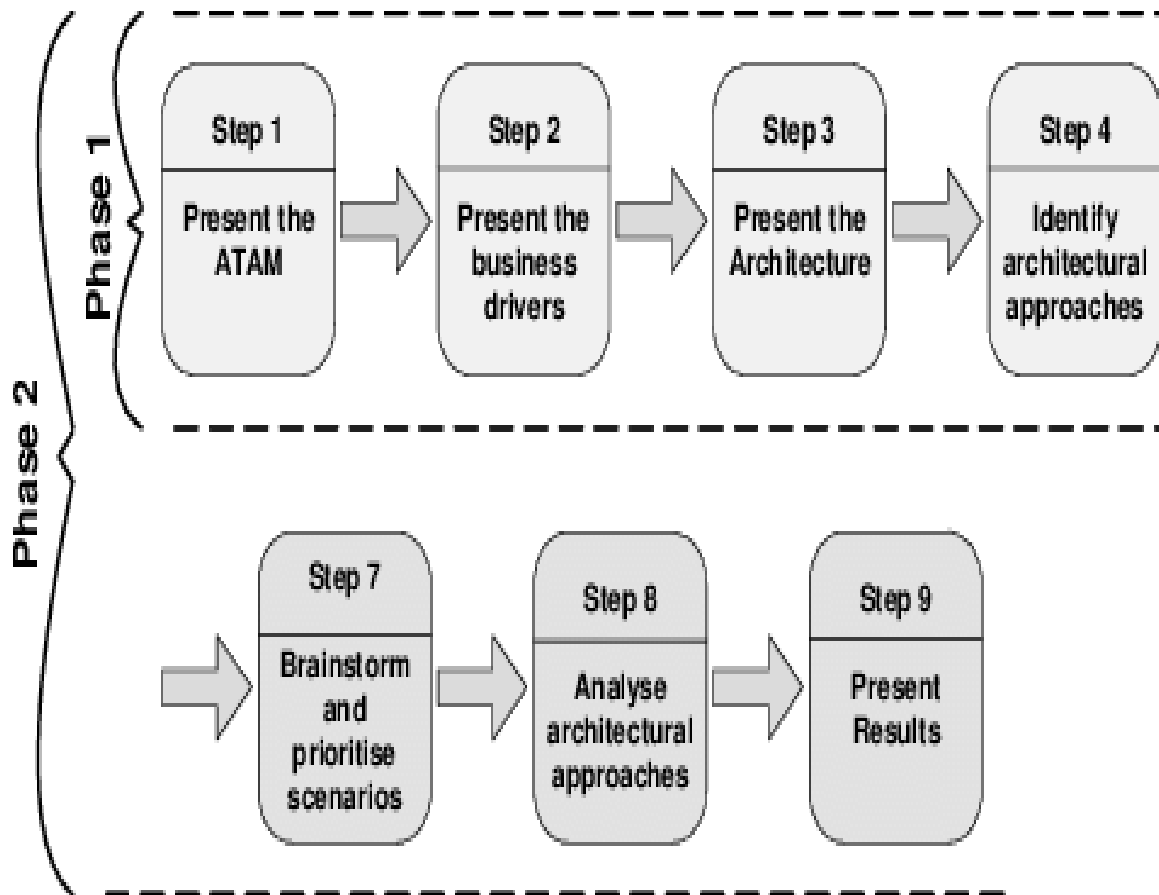


Рисунок 2.1 - Загальна схема методу ATAM

Метод ATAM підходить для проектування FPV-квадрокоптеру та його підсистем через компроміси між різними архітектурними варіантами враховуючи різні обмеження та вимоги.

## 2.2 Стейкхолдери системи їх цілі та зацікавленість у системі

Зацікавлена сторона(Стейкхолдери) - це особа, група чи організація, на яку впливають результати проекту чи бізнес-підприємства. Зацікавлені сторони зацікавлені в успіху проекту і можуть перебувати як в організації, яка спонсорує проект, так і поза нею. Зацікавлені сторони важливі, оскільки своїми рішеннями вони можуть позитивно чи негативно впливати на проект. Є також критичні або ключові зацікавлені сторони, підтримка яких потрібна для існування проекту [10].

Усі стейкхолдери FPV-квадрокоптеру будуть зображені на рисунку 2.2

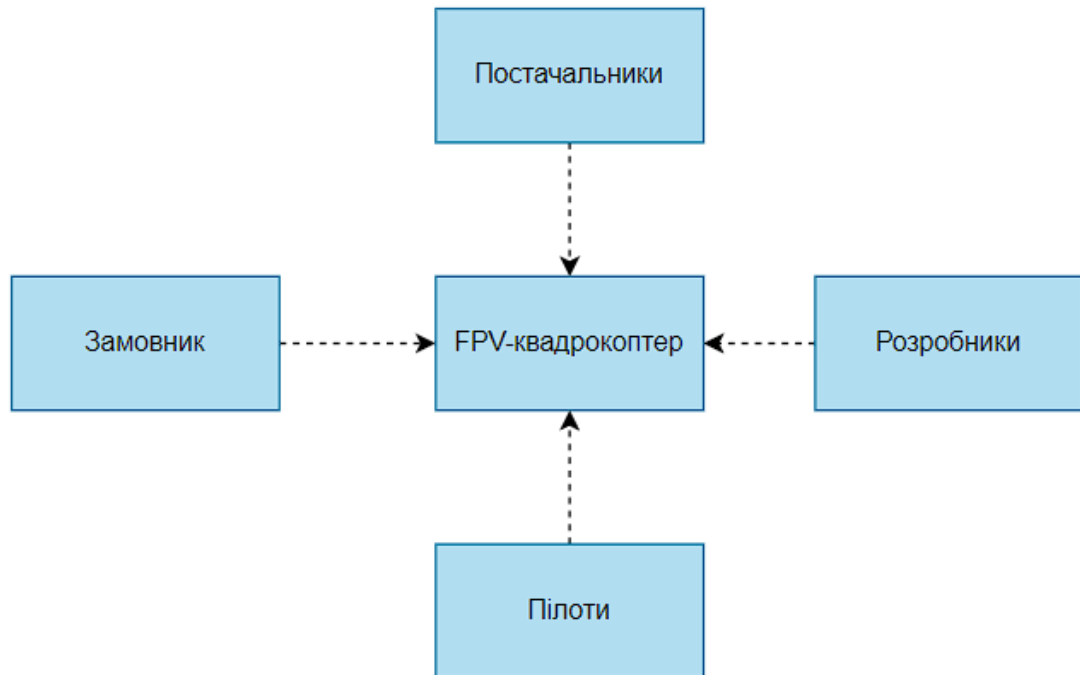


Рисунок 2.2 – Стейкхолдери FPV-квадрокоптеру

Першою зацікавленою стороною є замовники або інвестори, які зацікавлені у розробці FPV-квадрокоптеру. Їх мета завдяки своїм коштам найняти компанію розробників, які в свою чергу будуть створювати систему FPV-квадрокоптеру. Розробники є другими стейкхолдерами, які завдяки своїм вмінням реалізують систему FPV-квадрокоптеру. Для того, щоб розробникам було що роботи додаються постачальники, які в свою чергу займаються створенням плат та інші елементи, які будуть використовуватись при розробці. Останньою зацікавленою стороною є пілоти FPV-квадрокоптеру, які будуть основними користувачами та своєрідними тестувальниками.

### 2.3 Функціональні вимоги

Функціональні вимоги - це одна з основних категорій вимог у процесі розробки програмного забезпечення. Вони описують функції, які система має виконувати або операції, які система має здійснювати. Функціональні вимоги визначають, як система повинна вести себе в певних ситуаціях та які операції і функції вона має надавати для користувачів або інших систем [11].

Функціональні вимоги будуть розділені на частини, а саме:

-FPV-квадрокоптер;

-система скидання;

-система автонаведення.

Для FPV-квадрокоптеру важливими функціональними вимогами є стабільний політ з контролем позиції та напрямком квадрокоптера. Це основний функціонал який повинен бути у будь якого квадрокоптера. Наступною функціональною вимогою є ELRS протокол, через який буде відбуватись передача даних між FPV-квадрокоптером та пілотом до ELRS протоколу додається ведення відеозйомки та передача даних в реальному часі. Для покращення керування також потрібна підтримка різних режимів керування. Останньою функціональною вимогою до FPV-квадрокоптеру це передача телеметрії щодо заряду батареї та висоти польоту та поточного споживання струму.

Для системи скидання основною функціональною вимогою є керування статусом скидання та можливість спілкуватись з FPV-квадрокоптером напряму через польотний контролер. Також до функціональних вимог потрібно віднести фіксацію різних типів боєприпасу та забезпечення стабільності боєприпасу при його встановленні.

Для системи автонаведення основною функціональною вимогою є розрахунок траєкторії руху об'єкту для наведення та супроводження цілі для ураження. Також до функціональних вимог відноситься класифікація на основі розміру швидкості та інших даних. Система автонаведення також повинна враховувати дані погодних умов та ваги боєприпасу.

Усі функціональні вимоги для всіх частин зображені на рисунку 2.3.

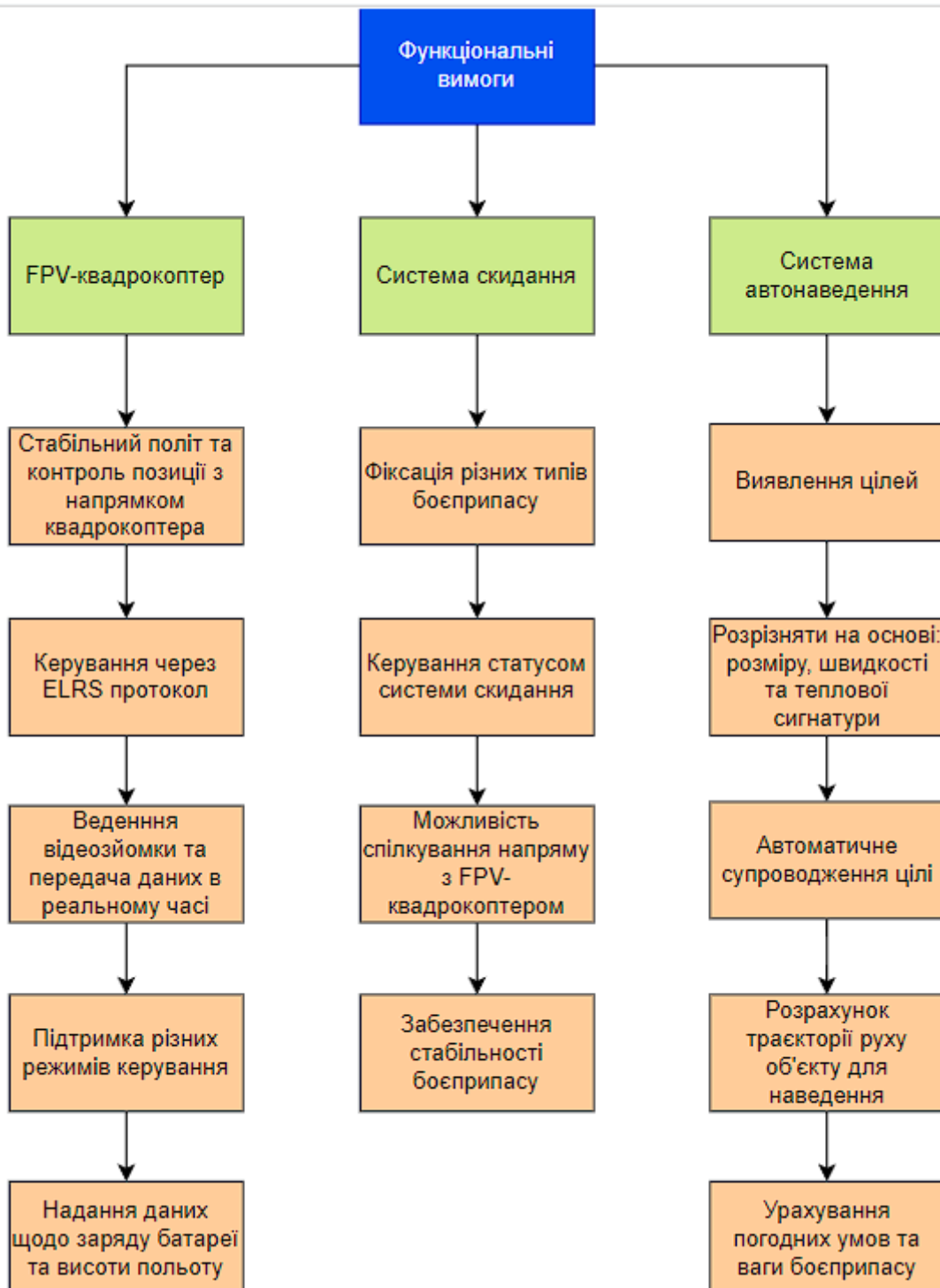


Рисунок 2.3 – Функціональні вимоги усієї системи

На базі цих функціональних вимогах буде будуватись майбутня комплексна система FPV-квадрокоптеру з підсистемами.

## 2.4 Обмеження системи

Система FPV-квадрокоптеру з системами скидання боєприпасів та системою автонаведення мають обмеження, які важливо враховувати для забезпечення безпеки, ефективності та дотримання регуляторних норм. Основні обмеження включають наступне:

- FPV-квадрокоптери повинні дотримуватися всіх місцевих, національних та міжнародних законів та правил щодо використання безпілотних літальних апаратів. Це включає правила стосовно максимальної висоти польоту, зон обмеженого використання, реєстрації БПЛА та інших обмежень;

- система автонаведення повинна бути надійною та запобігати помилковим наведенням на неворожі цілі;

- вимоги до безпеки скидання боєприпасів;

- засоби уникнення випадкового скидання боєприпасів;

Обмеження таких систем є важливими з погляду безпеки та дотримання законодавства. Розробники та пілоти FPV-квадрокоптерів повинні ретельно вивчати та дотримуватися цих обмежень під час розробки та використання систем FPV-квадрокоптеру з системами скидання боєприпасів та системою автонаведення. Військові та правоохоронні органи можуть встановлювати власні обмеження та вимоги щодо використання таких систем [12].

## 2.5 Атрибути якості системи для FPV-квадрокоптеру

Усі підсистеми будуть працювати з головною, а саме FPV-квадрокоптером, тому з цієї системи слід почати.

Першим атрибутом якості FPV-квадрокоптеру є безпека. Під безпекою системи FPV-квадрокоптеру розглядається шифрування збережених даних. У збережені дані входить відеодані, які були записані за час польоту та вміст

усього програмного забезпечення, яке може бути викрадено у разі втрати FPV-квадрокоптеру. Також під цей атрибут підпадає самознищення FPV-квадрокоптеру у разі втрати зв'язку.

Другий атрибутом якості є продуктивність. До продуктивності відноситься:

- частота відмов критичних компонентів через які подальший політ неможливий. Наприклад під відмову критичних компонентів підходить втрата зв'язку через погодні умови або через ландшафтні особливості;

- можливість роботи в різних погодних умовах. Впродовж зими та холодної температури, яка може впливати на тривалість роботи FPV-квадрокоптеру. Також під погодні умови підпадає сила вітру при якій FPV-квадрокоптер буде стабільно працювати;

- рівень шуму через який можливо помітити FPV-квадрокоптер, чим довше його не чути та не видно, тим легше вразити ціль;

- діапазон дистанційного керування який може змінюватись під різним впливом радіоелектронної боротьби чи ландшафтних змін.

Наступним атрибутом якості є автономність до якого входить час роботи FPV-квадрокоптеру від одного заряду акумулятора при сприятливих погодних умовах.

Масштабованість кінцевого рішення FPV-квадрокоптера повинно включати можливість додавання або видалення функцій або компонентів без суттєвого перепроектування системи.

Останнім атрибутом якості системи є портативність системи, яка складається з ідеї можливості роботи на різних протоколах зв'язку. На рисунку 2.3 буде зображено дерево усіх атрибутів якості FPV-квадрокоптеру

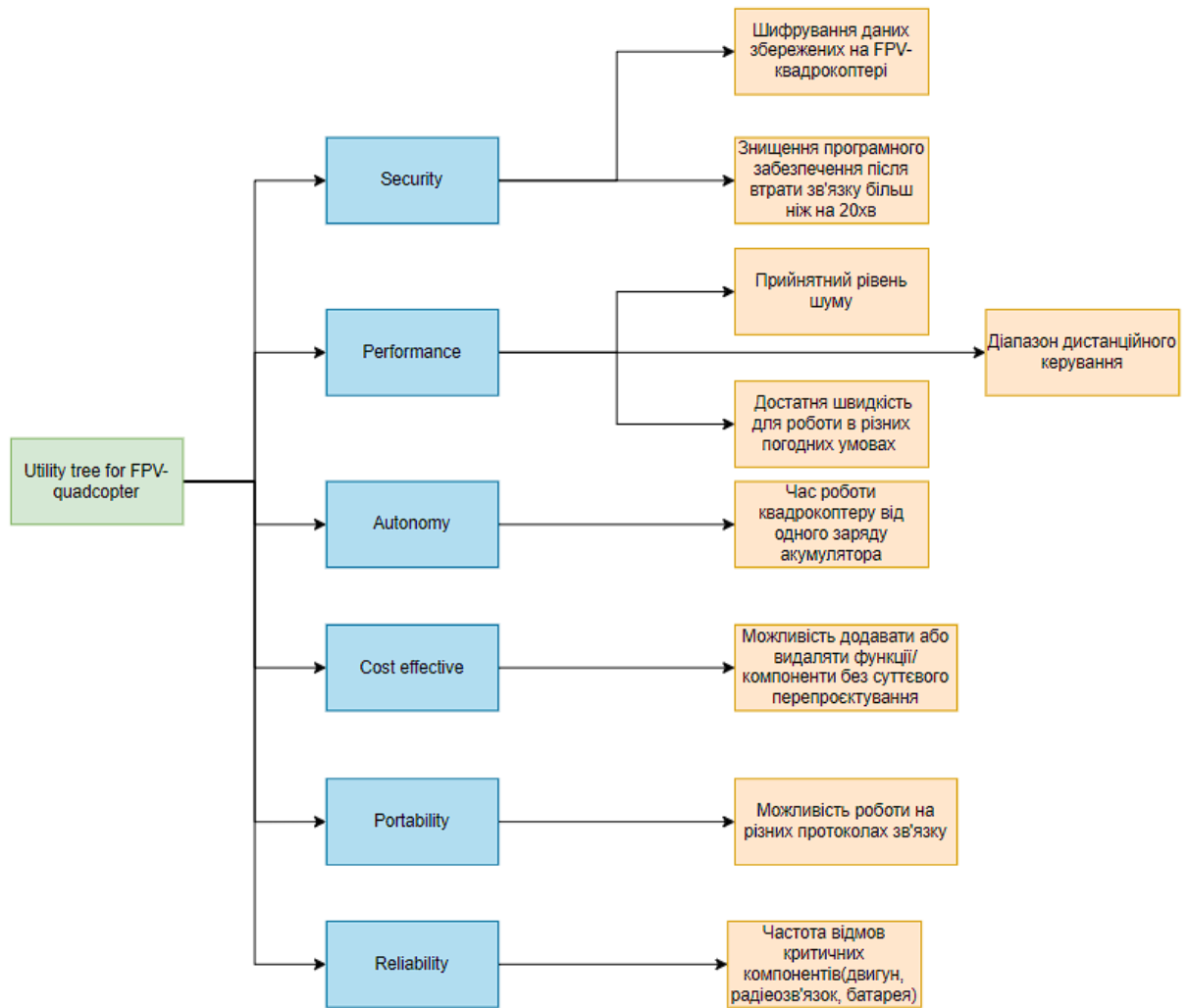


Рисунок 2.3 – Дерево усіх атрибутів якості FPV-квадрокоптеру

Ці атрибути якості забезпечують комплексну основу для оцінки та проєктування успішної системи FPV-квадрокоптера.

## 2.6 Атрибути якості для системи скидання боєприпасу

Атрибути якості до підсистеми FPV-квадрокоптеру, а саме система скидання боєприпасу має декілька важливих атрибутів, які будуть описані нижче.

Першим атрибутом якості системи скидання є портативність в яку входить забезпечення встановлення на різні рами FPV-квадрокоптера та робота з різними типами польотних контролерів. Головна проблема при

збірці того чи іншого FPV-квадрокоптера це те що польотний контролер та рама може бути різної формації і досить важливо, щоб система скидання підходила до більшості з них.

Другий атрибутом є продуктивність в яку входить максимальна вага та розмір боєприпасу, якими може оперувати система скидання. Також до продуктивності входить час затримки після отримання та обробки сигналу.

Наступним атрибутом є автономність системи скидання. В цей атрибут входить час роботи системи скиду від батареї. У системі скиду не можливо буде змінювати акумулятор для її роботи. Тому важливо щоб система скидання при різних погодних умовах трималась приблизно 12 годин. Також під атрибут автономності додається час зарядки батареї.

Останнім атрибутом якості системи скидання є надійність. До надійності входить механізм скидання, де повинен бути мінімальний відсоток невдалого скидання через механічну помилку.

На рисунку 2.4 буде зображено дерево усіх атрибутів якості системи скидання.

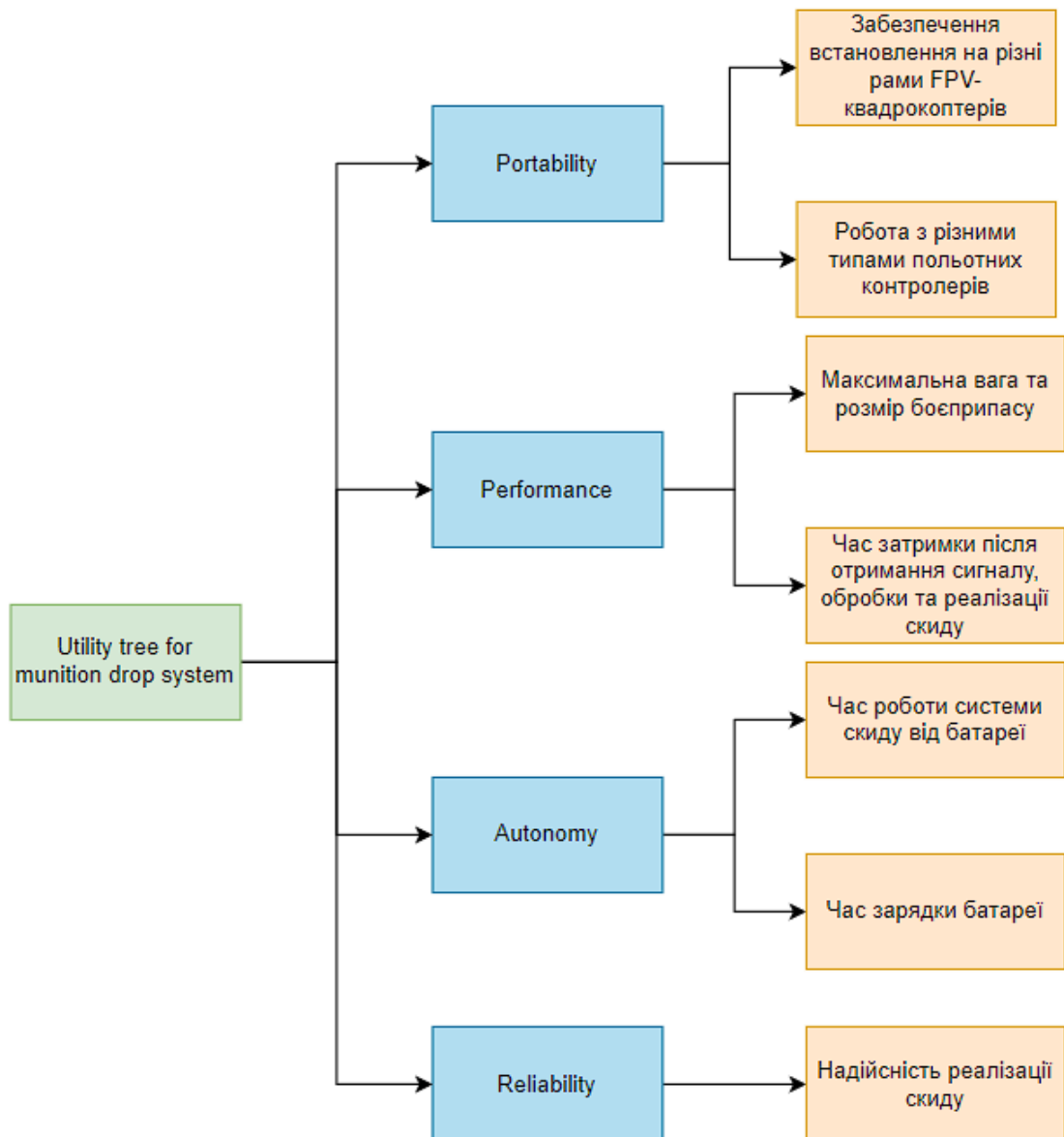


Рисунок 2.4 – Дерево усіх атрибутів якості для системи скидання

На базі цих атрибутів якості системи скидання буде відбуватись оцінка та проектування.

## 2.7 Атрибути якості для системи автонаведення

Останньою підсистемою на розгляді є система автонаведення, до неї як і до інших теж потрібно описати атрибути якості.

Першим та досить важливим атрибутом якості є доступність системи автонаведення під час польоту. Система автонаведення як і інші електронні частини FPV-квадрокоптеру споживають енергію, чим більше енергії спожити тим менше FPV-квадрокоптер зможе пролетіти до цілі або переслідувати ціль, тому постійна робота системи автонаведення є не вигідною. Найбільш вплив системи автонаведення є на останній стадії коли об'єкт ураження в полі зору.

Наступним атрибутом якості є продуктивність в яку входить:

- точність прицілювання та точність ураження;
- точність прицілювання та точність ураження при врахуванні погодних умов;
- швидкість визначення об'єкту.

На базі атрибутів продуктивності буде вимальовуватись загальна картина ефективності системи автонаведення.

Останнім атрибутом якості для системи автонаведення є автономність. Цей атрибут частково зв'язаний з доступністю, але характеризує вплив роботи системи автонаведення на загальний час роботи FPV-квадрокоптеру, тобто у доступності перевіряється можливий час роботи самої системи автонаведення. У атрибуті автономності вираховується загальний можливий час роботи всіх систем з впливом системи автонаведення.

На рисунку 2.5 буде зображено дерево атрибутів якості для системи автонаведення.

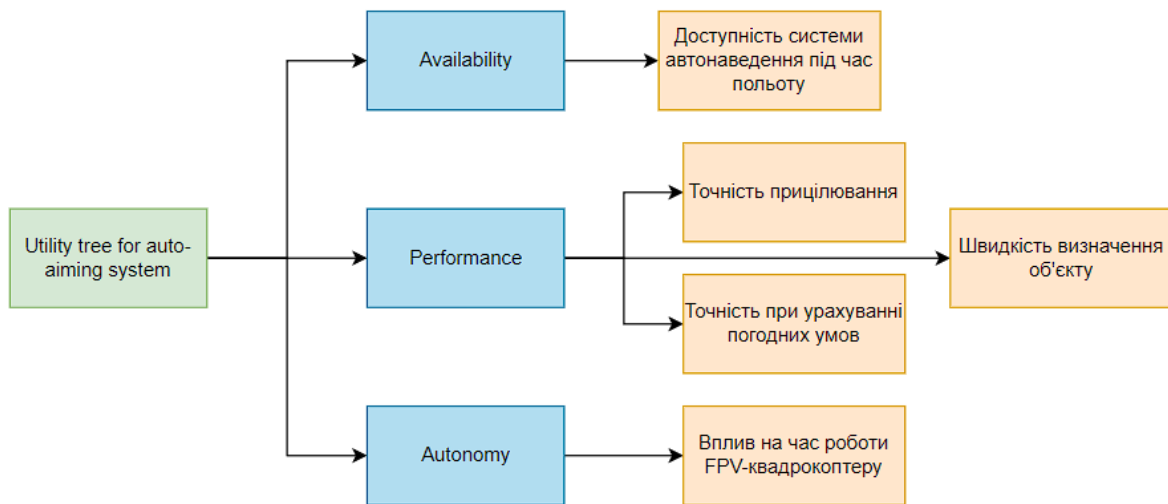


Рисунок 2.5 – Дерево атрибутів якості для системи автонаведення

Усі атрибути якості, які були описані будуть використовуватись для проєктування та оцінювання проєктного рішення.

## 3 ОПИС АРХІТЕКТУРИ ЗА МЕТОДОМ 4+1

### 3.1 Модель архітектурного вигляду 4+1

Метод "4+1" - це одна з архітектурних моделей, яка використовується для опису архітектури програмного забезпечення. Вона визначає структуру програми, розглядаючи її з різних точок зору та рівнів абстракції. Цей метод допомагає організувати архітектурну розробку та спростити комунікацію між різними командами в різних аспектах розробки програми. Модель 4+1 складається з п'яти основних видів:

- логічне представлення системи;
- представлення процесу, який зображує різні аспекти паралельності та синхронізації проєкту;
- фізичний вигляд, який описує відображення програмного забезпечення на апаратне забезпечення та відображує його розподілений аспект;
- представлення розробки, яке фактично описує статичну організацію програмного забезпечення в його середовищі розробки.

На рисунку 3.1 буде зображено загальну схему усіх видів 4+1

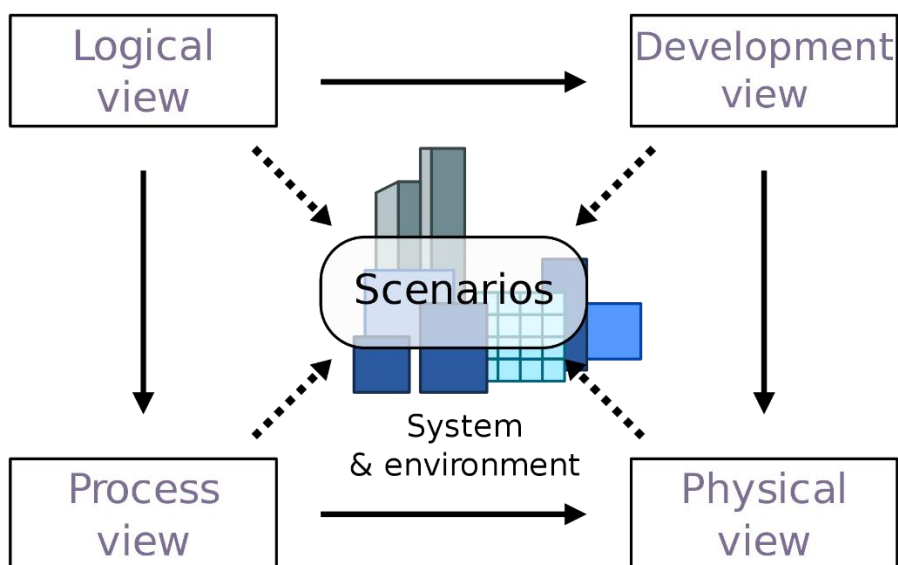


Рисунок 3.1 – Загальна схема моделі 4+1

Метод "4+1" вказує на чотири описи архітектурних виглядів, які покривають різні аспекти системи та плюс один вигляд сценаріїв взаємодії у системі, який об'єднує всі архітектурні види в контексті конкретних сценаріїв використання системи. Цей метод дозволяє розробникам та архітекторам краще розуміти та керувати складною архітектурою системи на різних рівнях деталей [13].

### 3.2 Логічна архітектура системи

Логічний погляд на архітектуру системи це один з п'яти архітектурних видів у методі 4+1, який спрямований на опис логічної структури системи. Цей вид архітектури концентрується на внутрішній організації та логіці системи без прив'язки до конкретної фізичної реалізації. Логічний погляд буде формуватись зі схеми, яка буде будуватись за легендою, яка зображена на рисунку 3.2

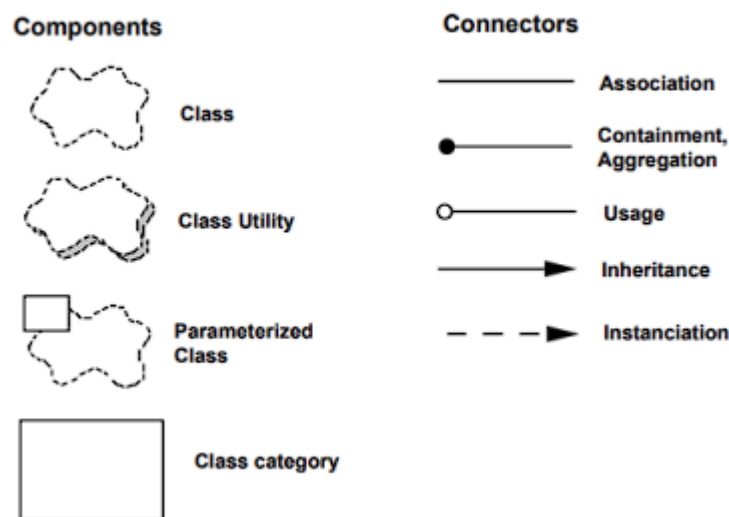


Рисунок 3.2 – Легенда до логічної схеми

Після отримання розуміння складу легенди можна переходити до реалізації логічної схеми. Логічна схема складається з основної системи FPV-квадрокоптеру, яка буде оперувати через внутрішні зв'язки з системою

скидання та систему автонаведення. На рисунку 3.3 буде зображено логічну схему.

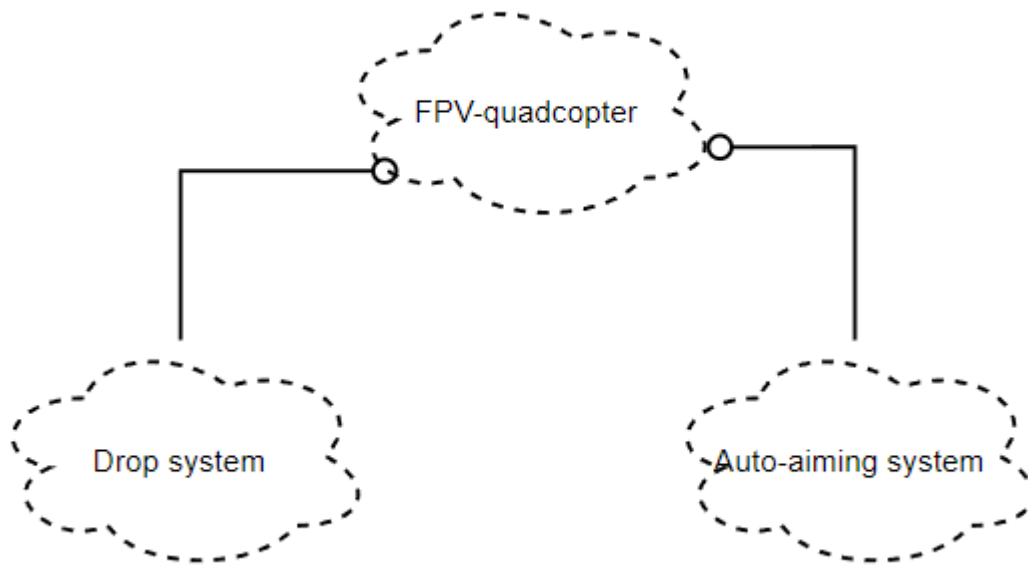


Рисунок 3.3 – Логічна схема системи

Логічна схема допомагає зрозуміти загальну структуру системи та допомагає при подальшому проектуванні.

### 3.3 Архітектура розробки FPV-квадрокоптеру

Архітектурний погляд на розробку системи FPV-квадрокоптера містить архітектурне бачення саме FPV-квадрокоптеру без підсистем. Першою частиною FPV-квадрокоптера є приймач. Через нього передаються дані стосовно позиції за рахунок трьох осей:

- нахил це кутовий рух або обертання FPV-квадрокоптера навколо поперечної вісі, яка ідентифікується в якості передньої частини, себто йде зміна нахилу корпусу вгору або вниз;

- крен це кутовий рух або обертання FPV-квадрокоптера навколо продольної вісі, себто йде нахил корпусу вліво або вправо;

- поворот це кутовий рух або обертання FPV-квадрокоптера навколо своєї вертикальної осі, себто йде зміна напрямку у горизонтальній площині.

Також до цих даних додається газ, який відповідає за швидкість віддачі силового входу до двигунів, які обертають пропелери. За рахунок газу регулюється висота польоту FPV-квадрокоптеру та швидкість.

Ці дані передаються до польотного контролера, який в свою чергу їх обробляє та порівнює з тими даними, які були на момент їх отримання та змінює у разі зміни. Польотний контролер є центром усього FPV-квадрокоптеру більшість функцій відбуваються у ньому. Тому до польотного контролера доєднується. Контролер батареї зазвичай він вбудований до плати польотного контролера. Також для керування двигунами додається регулятор швидкості, який оперує струмом та напругою яка подається на двигуни FPV-квадрокоптеру. Останньою частиною системи є трансмітер відеопередачі з камери.

Усі елементи будуть зображені на діаграмі компонентів рисунок 3.4

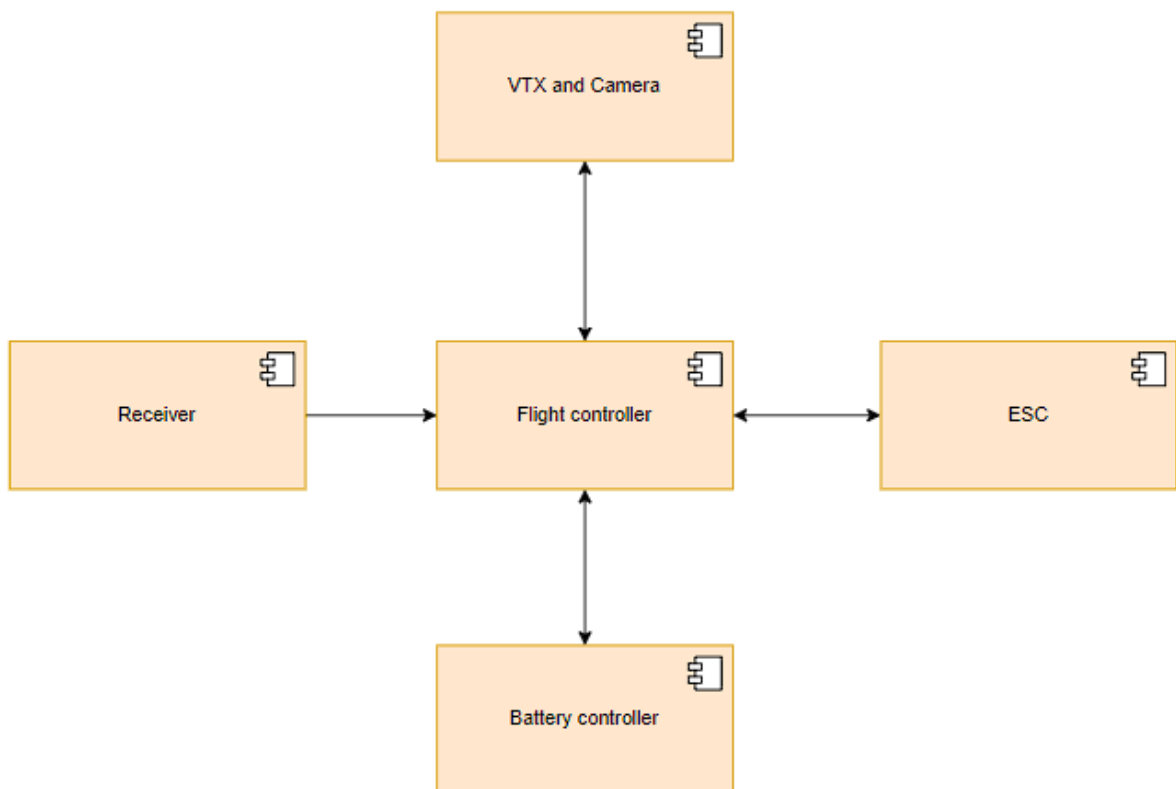


Рисунок 3.4 – Діаграма компонентів для FPV-квадрокоптеру

Саме ці компоненти будуть входити у майбутню систему FPV-квадрокоптеру.

### 3.4 Архітектура розробки системи скидання та системи автонаведення

Для системи скидання є два основних компоненти, а саме:

-серводвигун або серводвигуни, які змінюють поточний стан системи скидання, себто відкривають або закривають тримачі боєприпасу;

-контролер заряду та зарядки, система скидання буде мати окрему батарею, для живлення серводвигунів.

Наступні компоненти залежать від польотного контролера, якщо на польотному контролері піни мають таймери для генерації ШИМ-сигналу [14], то серводвигун можливо приєднати напряму до польотного контролера. Цей варіант буде зображено на рисунку 3.5.

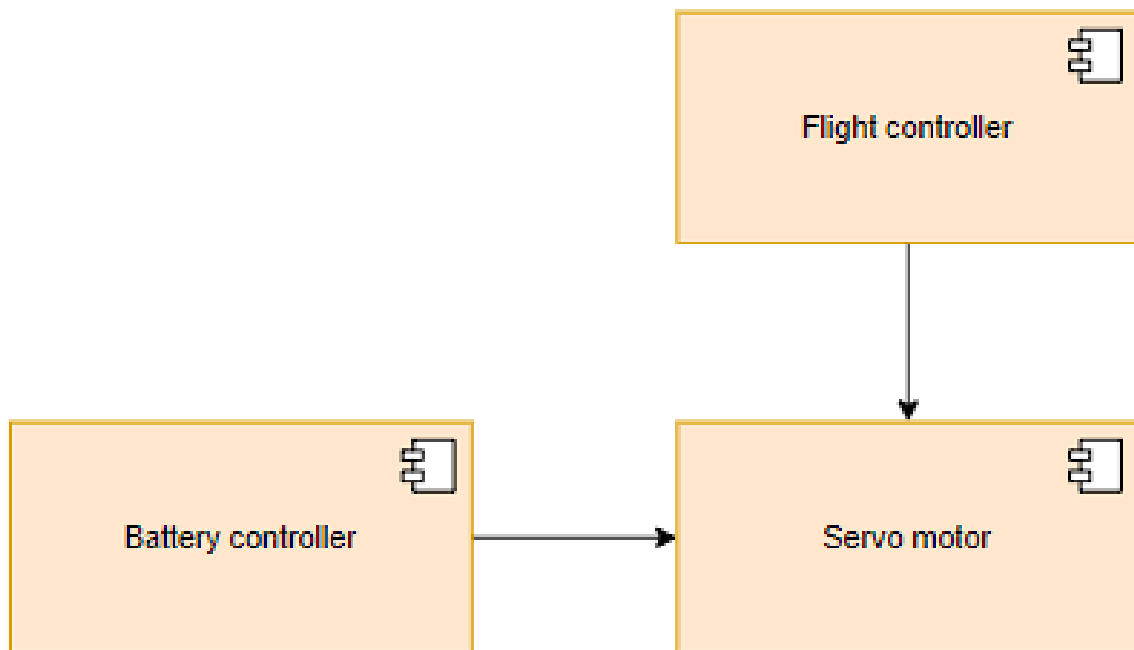


Рисунок 3.5 – Діаграма компонентів для скидання основний варіант

Якщо польотний контролер немає змоги генерувати ШИМ-сигнал або всі місця зайняті, то потрібно додати інтегровану плату ШИМ-сигналу, що зменшить кількість зайнятих місць на польотному контролері. Також інтегрована плата ШИМ-сигналу є досить малою та дешевою, що чудово підходить для майбутнього рішення. Такий варіант системи скидання буде зображений на рисунку 3.6

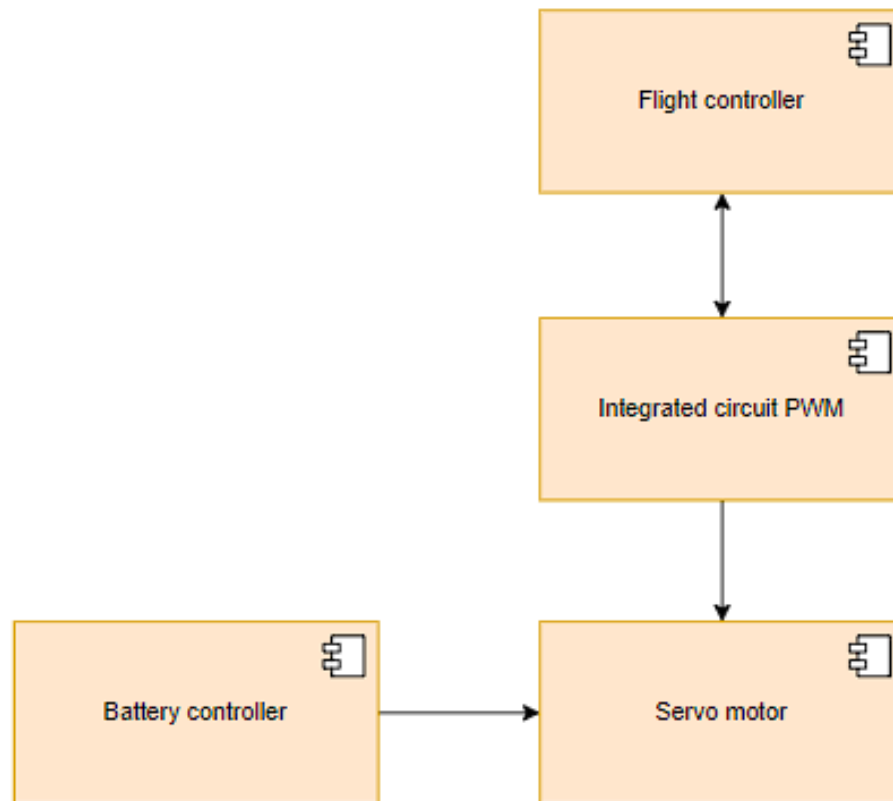


Рисунок 3.6 – Діаграма компонентів для скидання запасний варіант

Який би варіант не був обраний, обидва представлення є кращою реалізацією ніж той, який використовується на даний момент.

Для системи автонаведення все складніше через обробку відео та пошук об'єкту у кадрі. Польотний контролер скоріш за все не в змозі обробляти подібні навантаження. Тому для реалізації та проектування системи автонаведення потрібен зовнішній мікроконтролер, як зможе обробляти такий потік даних та буде зв'язаний між відеокамерою та польотним контролером. Проблема схожа з системою скидання, від польотного контролеру залежить кінцеве рішення. Тобто навіть якщо немає на ринку польотного контролеру який може підтримувати систему скидання та систему автонаведення, то для покращення взаємодії між системами, потрібно розробляти свій польотний контролер у якого буде достатньо обчислювальних спроможностей та кількості портів для підключення дотичних підсистем. На рисунку 3.7 буде зображено діаграму компонентів з додатковим мікроконтролером для обробки відео з камери.

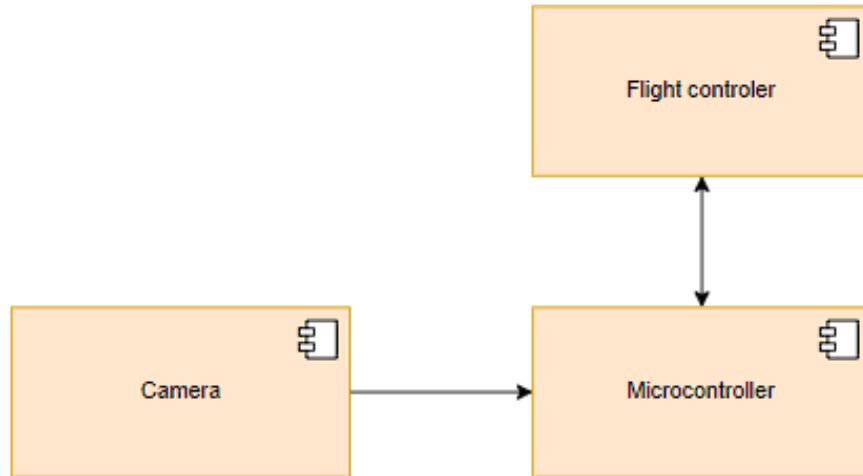


Рисунок 3.7 – Діаграма компонентів для системи автонаведення

На цьому архітектура розробки систем скиду та автонаведення закінчена час переходити до погляду на архітектуру за процесами.

### 3.4 Архітектура процесу системи

Архітектура процесу буде складатись з основних процесів, які протікають у FPV-квадрокоптері та підсистемах.

На рисунку 3.8 буде зображено архітектурно схему процесів FPV-квадрокоптеру.

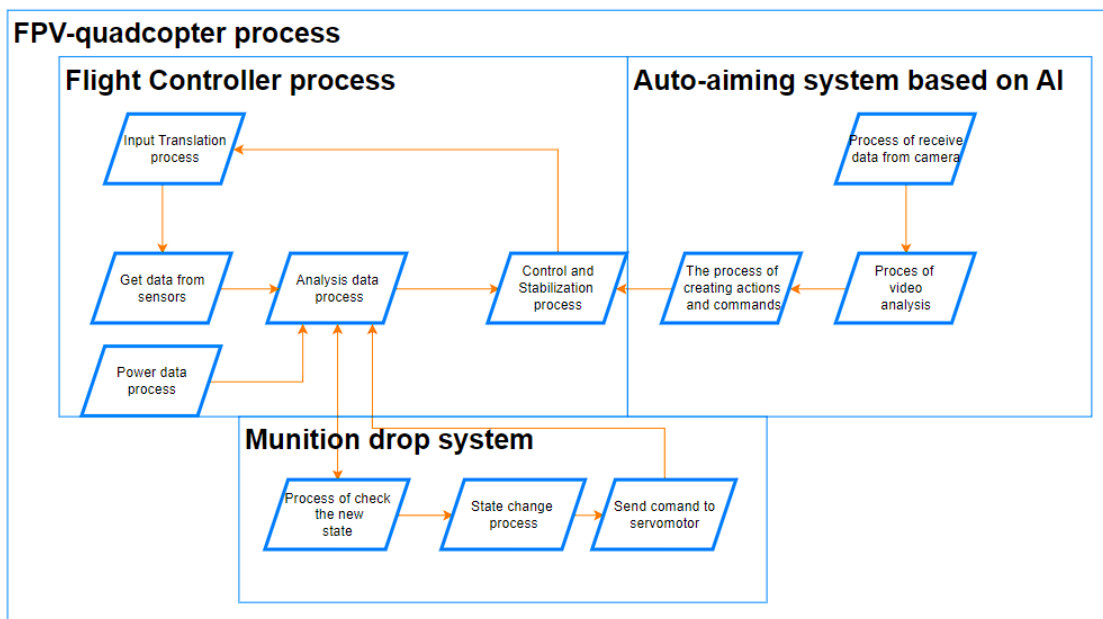


Рисунок 3.8 – Архітектурна схема процесів FPV-квадрокоптеру

Схема процесів ділиться на три основних процеси:

- процеси польотного контролеру;
- процеси системи скидання;
- процеси системи автонаведення.

Після того як пілот FPV-квадрокоптеру згенерував сигнал та той дійшов до приймача. Польотний контролер трансформує інформацію що прийшла, та отримує дані з датчиків для їх аналізу. При аналізі даних відбувається перевірка, чи надійшов сигнал скидання. Якщо сигнал надійшов, то система змінює стан та надсилає команду до серводвигуна, який тримає боєприпас. Після аналізу даних на польотному контролері йде наступний процес контролю та стабілізації польоту. Цей процес відповідає за напрямок польоту та інших характеристик FPV-квадрокоптеру. Саме на цей процес впливає система автонаведення. Система автонаведення працює окремо з камерою, яка встановлена та аналізує відеодані для визначення того чи іншого об'єкту. Наступним процесом є формування команд для направлення FPV-квадрокоптеру до цілі ураження. Кожен процес виконується циклічно після отримання даних від пілота.

### 3.5 Фізична архітектура FPV-квадрокоптеру

Фізична архітектура FPV-квадрокоптера буде складатись з опису усіх елементів, які потрібні для повноцінної роботи FPV-квадрокоптеру.

Основними компонентами FPV-квадрокоптеру є польотний контролер та регулятор швидкості. Для кращої взаємодії цих двох компонентів, краще обирати стек цих двох компонентів. Стекова версія є краще адаптованою версією взаємодії польотного контролеру та регулятору швидкості. Для майбутньої системи було обрано SpeedyBee F405 v3 Stack. Цей стек має можливість для підключення серводвигуна напряму, що надасть змогу приєднати систему скиду напряму до польотного контролеру. На рисунку буде зображено сам SpeedyBee F405 v3 Stack [15].

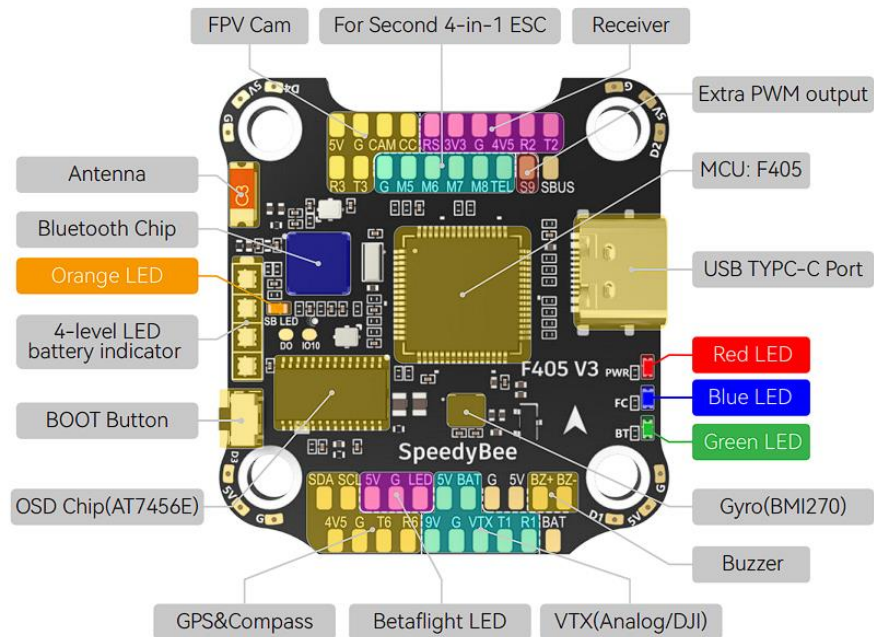


Рисунок 3.9 – Технічна специфікація SpeedyBee F405 v3

Також слід зазначити, що поточний стек може працювати з акумуляторами 3s-6s це вказує на кількість послідовних блоків акумуляторів, чим більше їх тим потужніше акумулятор. Зазвичай використовують 6s для FPV-квадрокоптера який повинен тягнути боєприпас до цілі. Наступним елементом FPV-квадрокоптера є двигуни, які зможуть працювати з 6s батареєю. Були обрані iFlight XING2 2207 2755KV [16], вони можуть працювати з 4s-6s батареями та 7-9 дюймовими рамами. На рисунку 3.10 буде зображений вигляд одного двигуна.

## iFight XING2 2207 1855KV

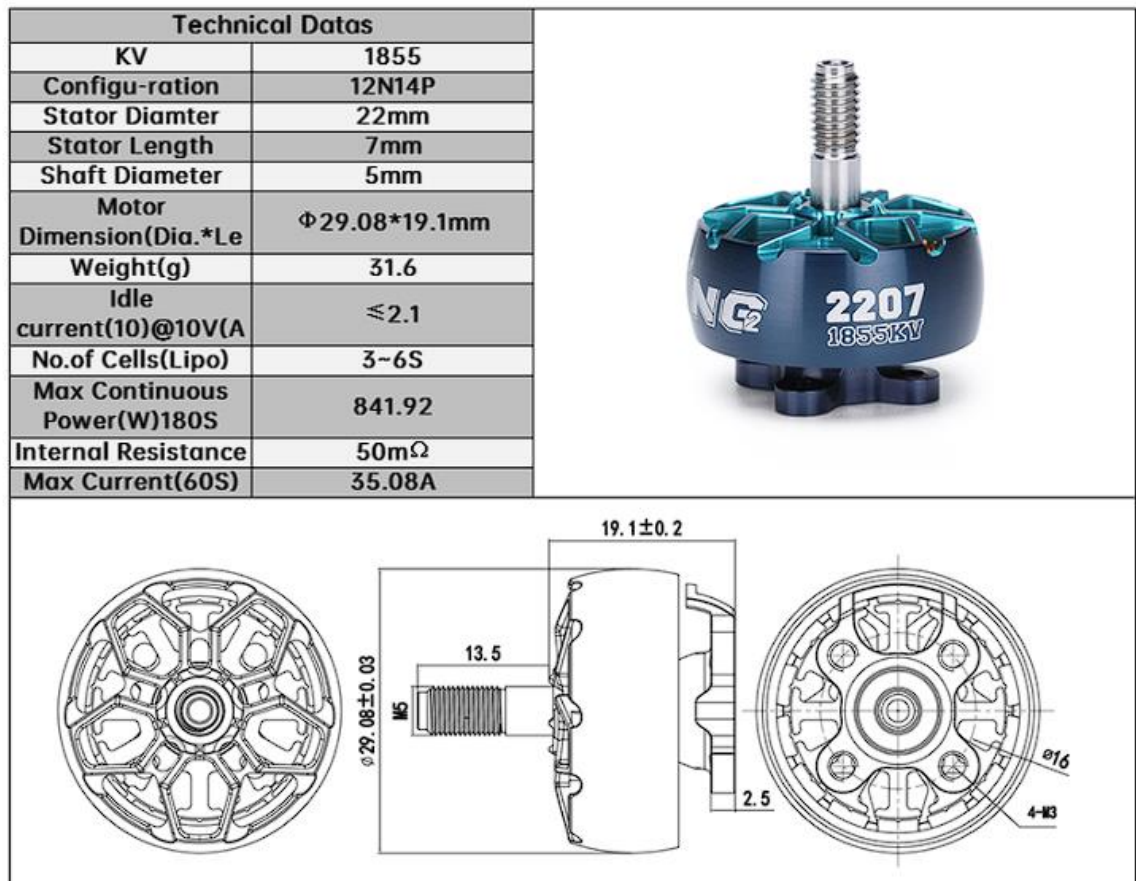


Рисунок 3.10 – Технічна специфікація двигуна XING2

Як було описано вище ці двигуни працюють з 7-9 дюймовими рамами, себто двигунам достатньо потужності для цих рам. Також можна відмітити, що його можна встановити на 5 дюймову раму, що може знизити загальну вагу рішення.

Для забезпечення універсальності рішення, рама FPV-квадрокоптеру повинна бути досить універсальною, тому було прийнято рішення обрати версію рами Mark4. Це рішення частіше за все використовують на FPV-квадрокоптерах. Також під цю раму можна створювати свої рішення, такі як система скиду та інше. Ця рама має різні розміри починаючи від 5 дюймів та закінчуючи 10 дюймами. Під поточну реалізацію та двигуни, було обрано 7 дюймів [17]. Зображення рами Mark4 буде на рисунку 3.11



Рисунок 3.11 – Рама Mark4

Наступними компонентами є передатчик відеоданих та камера. Зв'язок повинен бути аналоговим, так як цифровий досить легко глушити. Також аналоговий зв'язок є більш дешевшим варіантом. Передатчик відеоданих повинен бути розрахований на передачу даних на великій дистанції та варіюватись в районі 10 кілометрів. Для кращої взаємодії між польотним контролером та передатчиком відеоданих було обрано SpeedyBee TX800 [18]. На рисунку 3.12 буде зображено VTX SpeedyBee TX800.

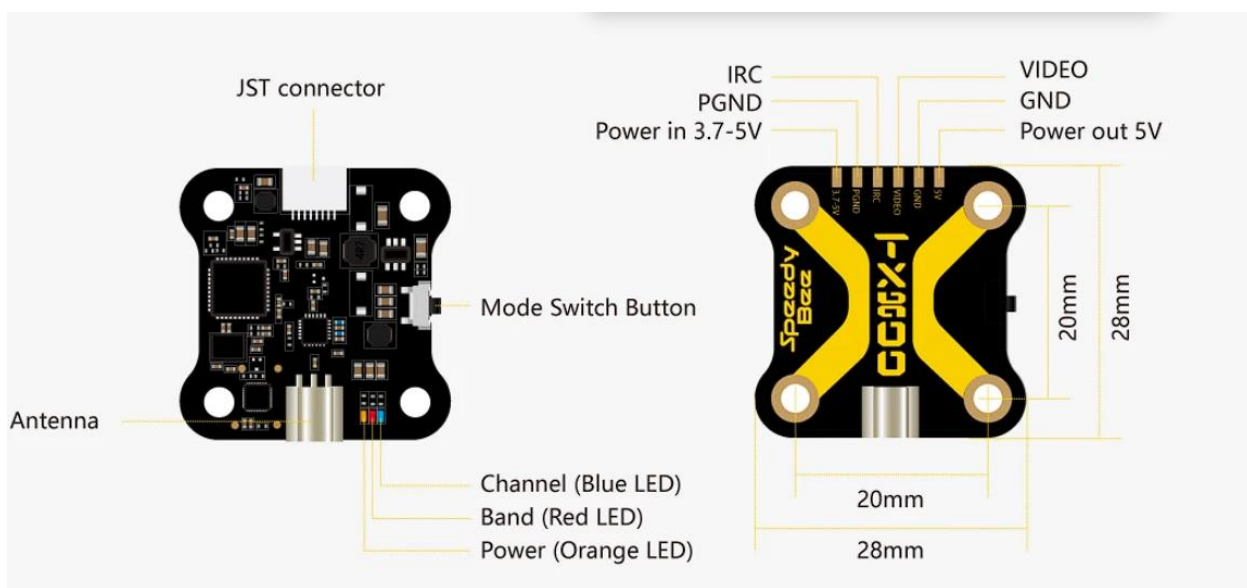


Рисунок 3.12 – VTX SpeedyBee TX800

VTX підтримує різноманітні FPV-камери. Для поточного рішення буде достатньо Foxeer Cat 3 [19]. Вона досить мала, має розширення у 1200TVL та підходить під наявний VTX. FPV-камера буде зображена на рисунку 3.13.



Рисунок 3.13 – FPV-камера Foxeer Cat 3

Останнім елементом FPV-квадрокоптера є приймач через який буде отримувати дані з трансмітера пілота FPV-квадрокоптера. Раніше було зазначено, що система повинна працювати на ELRS. Тому було обрано RadioMaster RP3 з підтримкою ELRS [20]. Його зображення на рисунку 3.14.



Рисунок 3.14 – RP3 ELRS

Останнім елементом FPV-квадрокоптеру є акумулятор під наявну систему та двигун з ESC було обрано бс акумулятор різного складу.

### 3.6 Фізична архітектура системи скидання

Фізична архітектура системи скидання буде складатись з опису внутрішніх елементів та в кінці буде представлена загальна схема.

Для системи скидання, яка працює на пряму з польотним контролером, потрібен лише серводвигун, так як усі інші дії буде виконувати сам польотний контролер. Серводвигун повинен бути достатньої потужності, щоб відкривати заслонку тримача боєприпасу. Тому було обрано серводвигун з металевим редуктором MG90S. Завдяки металевому редуктору система скидання буде працювати довший час та в загальному буде надійніша [21]. Серводвигун буде зображений на рисунку 3.15.

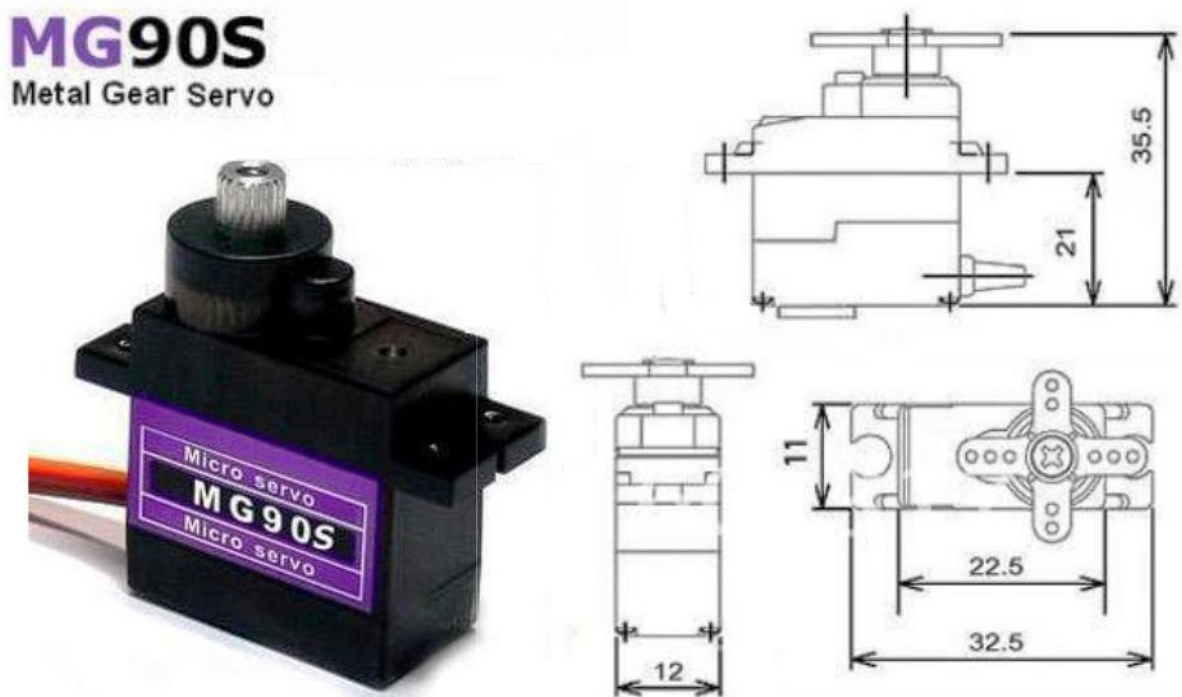


Рисунок 3.15 – Серводвигун MG90S

Фізична схема усієї системи включно з системою скиду, але без доповнюючі плати для системи автонаведення буде зображено на рисунку 3.16.

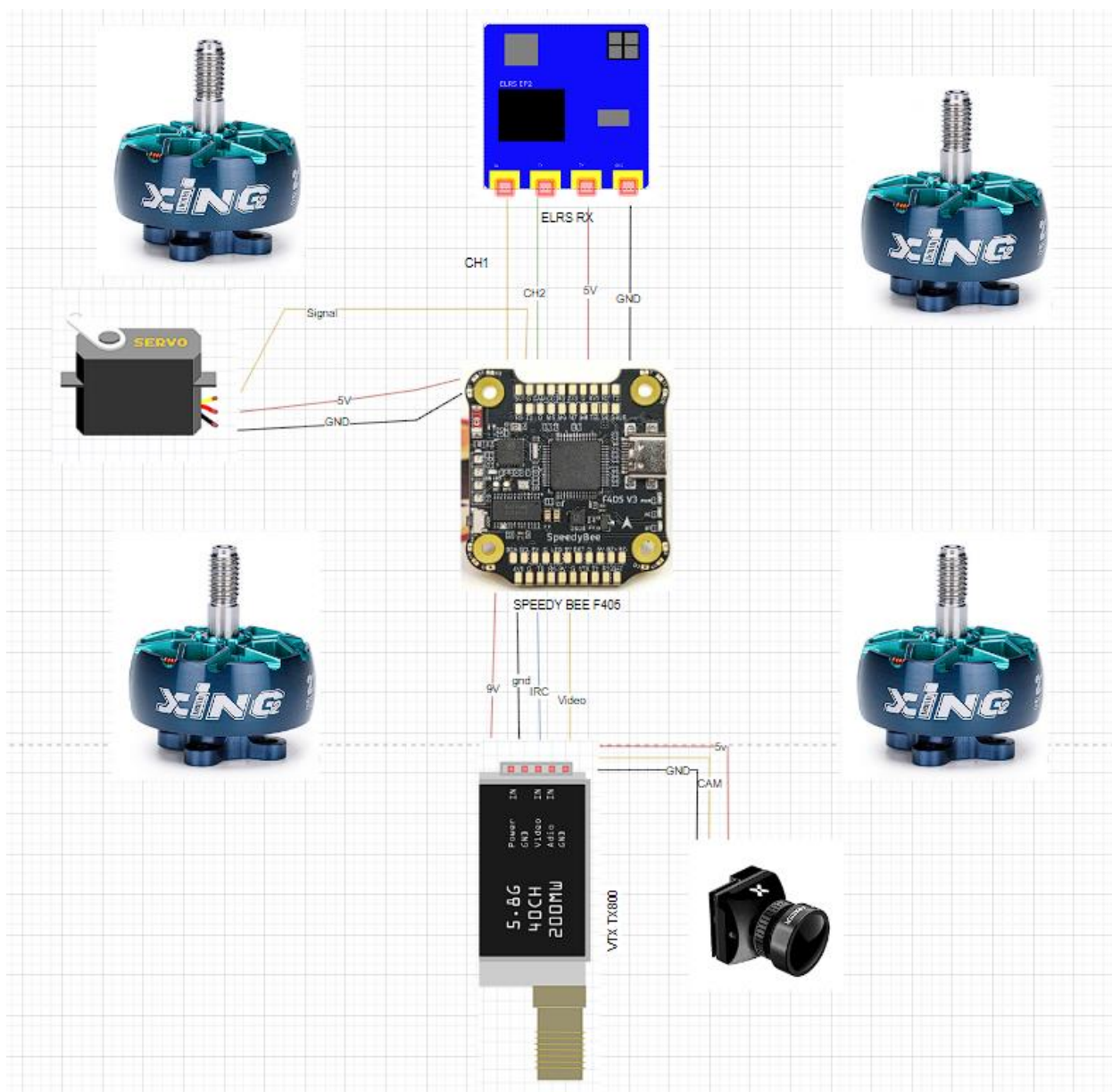


Рисунок 3.16 – Фізична схема

Схема зображує приєднання усіх описаних елементів та надає можливість реалізації кінцевого продукту на базі фізичної схеми.

### 3.6 Сценарії системи

Сценарії системи будуть розглядатись з точки зору оператора FPV-квадрокоптеру, тобто людини, яка буде напряму використовувати кінцевий продукт після реалізації. Дії оператора починаються з запуску FPV-квадрокоптеру та приєднання до нього. В процесі запуску польотний контролер ініціалізує основні компоненти та підсистеми. Після успішного запуску та приєднання, оператор повинен обирати режим роботи FPV-квадрокоптеру, а саме режим камікадзе, де система автонаведення стає в пріоритеті та система скидання де система скиду стає у пріоритеті. Після обрання визначеного режиму. У циклічному процесі йде обмін даними між приймачем та передавачем.

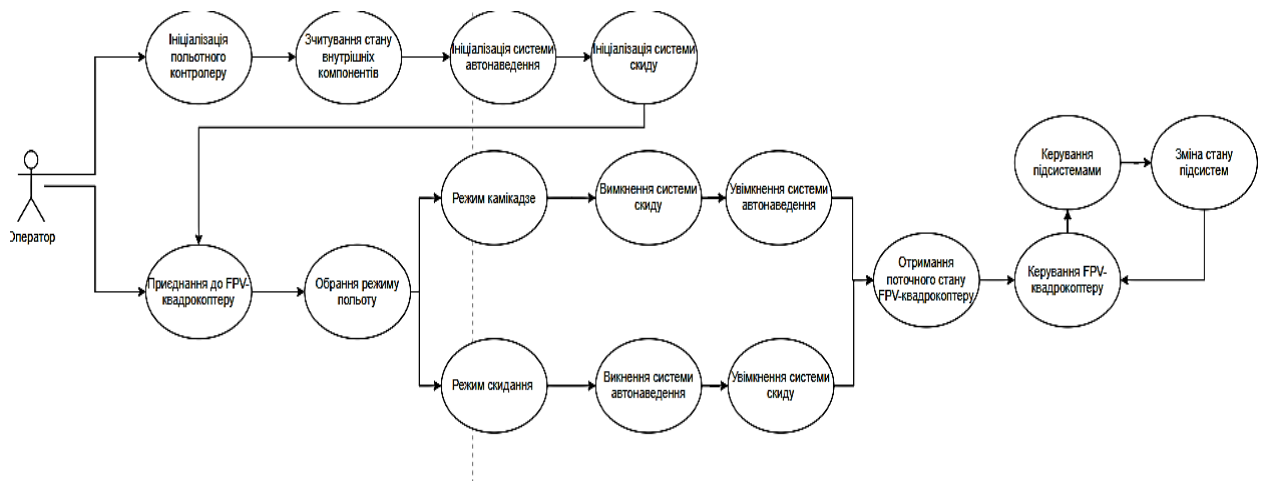


Рисунок 3.17 – Діаграма варіантів використання для оператора FPV

Цей етап є кінцевим у проєктуванні системи FPV-квадрокоптеру з інтегрованими системами скиду та автонаведення. Наступним етапом є реалізації спроектованих систем.

## 4 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ СКИДАННЯ

### 4.1 Моделювання та адаптування механічної частини системи скидання

Реалізація системи скидання складається з дизайну механічної частини та реалізації взаємодії між польотним контролером та самою системою скиду.

Для реалізації системи скиду буде використовуватись 3Д принтер та філамент PETG.

PETG - це поліетилентерефталат модифікований гліколем. Поліетилентерефталатгліколь - це термопластичний матеріал, який проявляє значну хімічну стійкість, довговічність і гарну придатність до формування, тобто система скиду буде стійка до різних температур, та не буде втрачати своєї форми при експлуатації [22].

В першу чергу система скиду повинна кріпитись до корпусу FPV-квадрокоптеру. В проєктній частині була обрана рама Mark 4, саме для цієї моделі буде робитись система скиду, але слід зазначити, що система також повинна кріпитись на інші рами для забезпечення універсальності. Реалізоване кріплення системи скиду для рами Mark 4 буде зображено на рисунку 4.1.

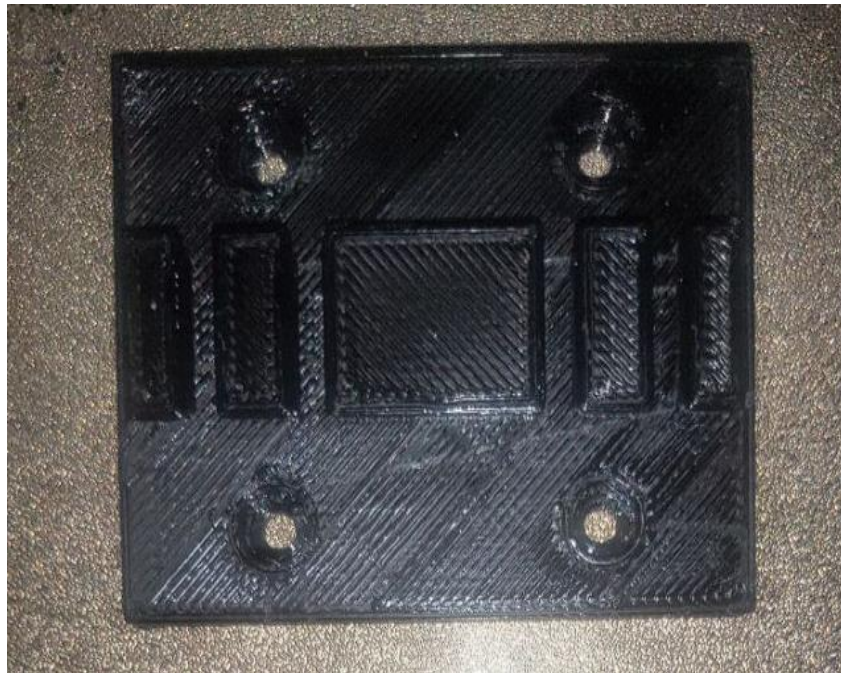


Рисунок 4.1 – Адаптер системи скиду для рами Mark 4

Корпус для системи скиду був адаптований під адаптер для рами Mark 4. Головною метою корпусу є утримка снаряду на собі, тому ця частина повинна забезпечувати міцність конструкції, для забезпечення безпеки використання. 3Д друк складається з накладання слою за слоєм для формування тієї чи іншої моделі, тому модель яка була надрукована та не оброблена хімікатами є менш міцною при використанні тонких слоїв. При моделювання цієї частини використовувались модель адаптеру сервоприводу, через те що рушійною силою всієї системи скиду є саме сервопривод. Customizable Servo Adapter [23] є досить простим, та полегшує моделювання.

Реалізація головного корпусу системи скиду буде зображена на рисунку 4.2.

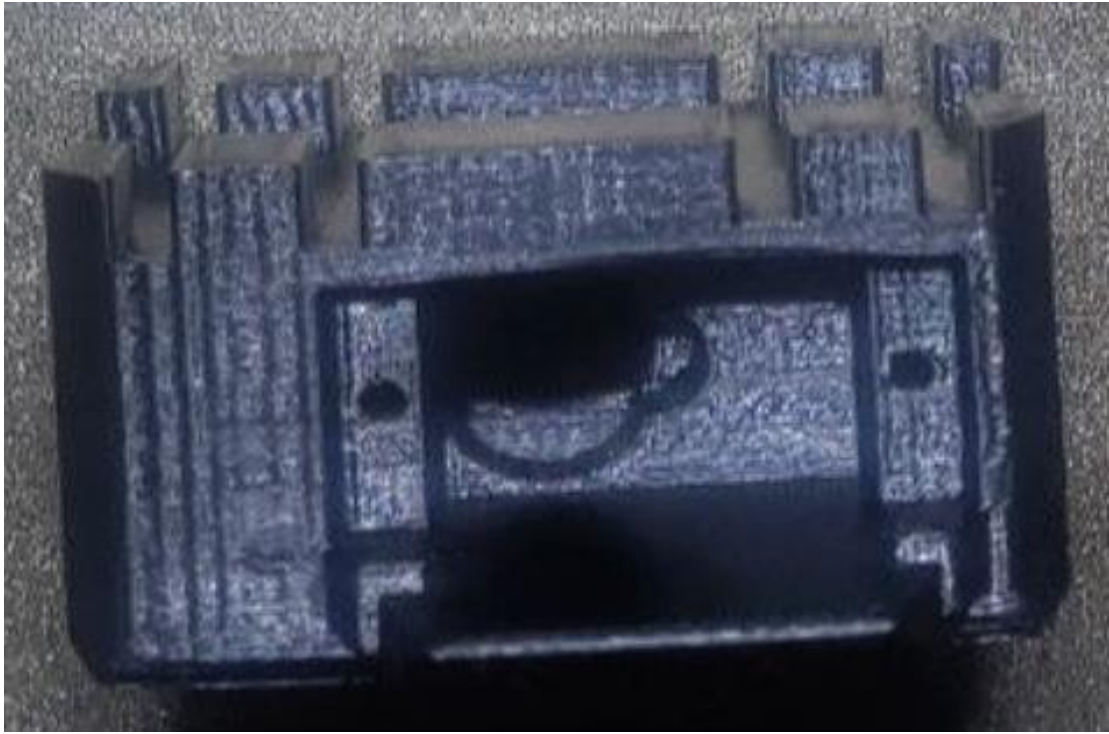


Рисунок 4.2 – Головний корпус системи скиду

Останньою частиною системи скиду є передача руху від сервоприводу до тримача снаряду. Ця частина в своїй суті є найважливішою, та впливає на час затримки скиду або його надійність. Проблема систем скиду є не дотягування механізму тримача снаряду. Причини цієї проблеми є різними від поганих сервоприводів до поганої реалізації корпусу. Зараз робляться досить різні системи скиду без якоїсь особливої стандартизації, на рівні гаражного виробництва. Ця частина також робилась на базі існуючої моделі, а саме сервозахвату [24], який повинен був утримувати вагу. Його вигляд буде зображений на рисунку 4.3.

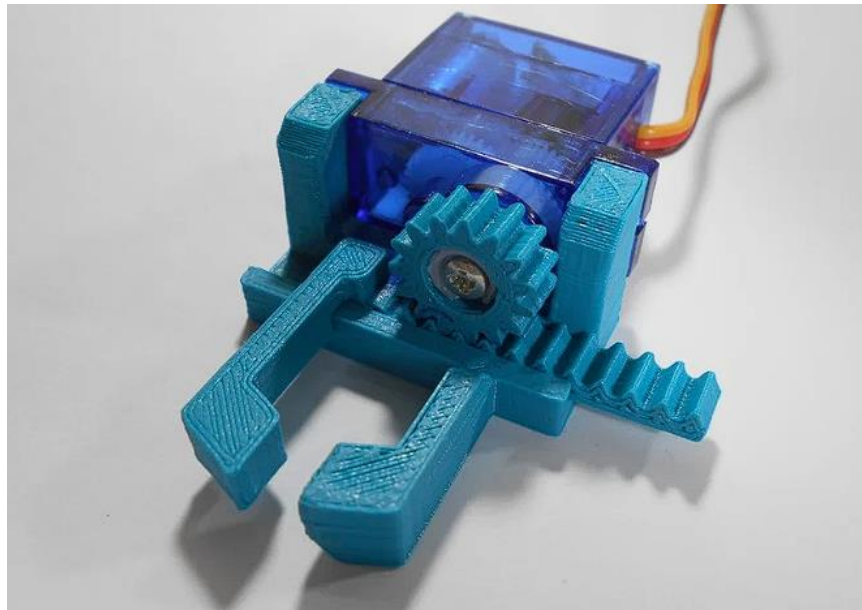


Рисунок 4.3 - Сервозахват

Після деякої адаптації під систему скиду, було створено роздільний варіант щеплення сервоприводу з тримачем снаряду, який буде зображений на рисунку 4.4.



Рисунок 4.3 – Щеплення між тримачем снаряду та серводвигуном  
Зібрана система з усіма елементами буде зображена на рисунку 4.4.

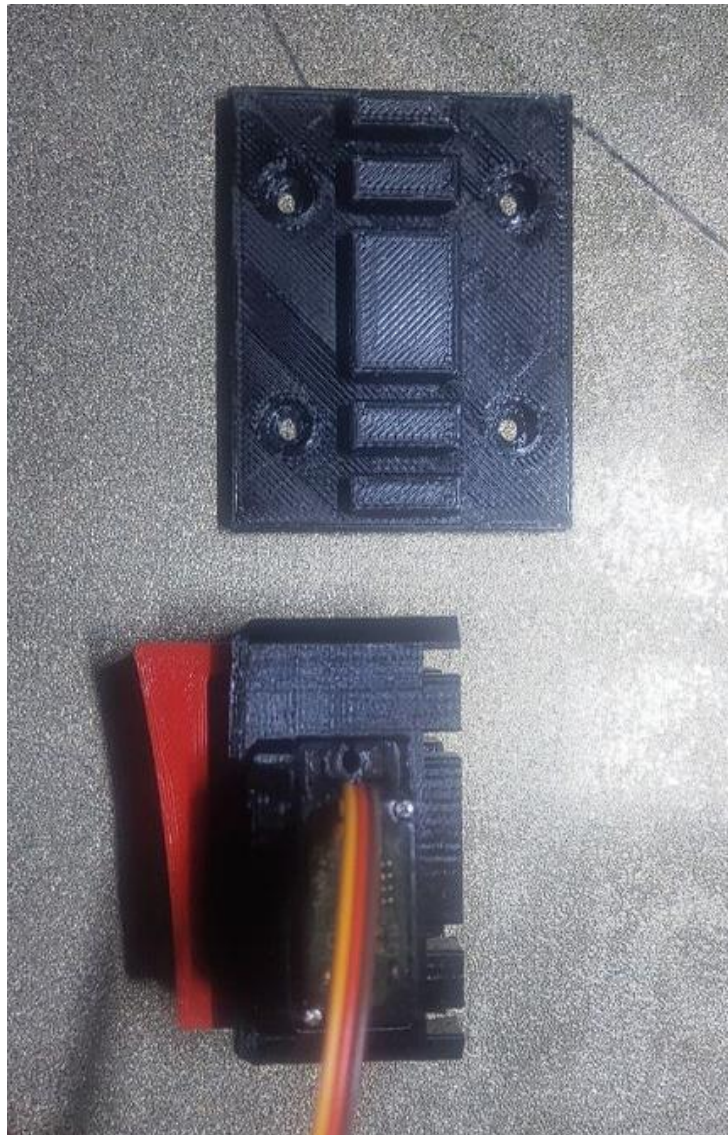


Рисунок 4.4 – Зібрана система скиду

На базі цього механізму буде проводитись тестування системи скиду. У наступному підрозділі буде описаний технічний стек тестування системи скиду.

#### 4.2 Технічний стек системи скиду

Технічний стек системи скиду будується на мові програмуванні C++. C++ - це загальновизнана мова програмування загального призначення, яка поєднує в собі можливості низькорівневого програмування та

високорівневого програмування. Мова була створена як розширення мови С з додаванням об'єктно-орієнтованих можливостей [25].

Тестування буде проходити за допомогою мікроконтролеру Arduino Uno [26]. Його задача земулювати використання системи скиду польотним контролером. На рисунку 4.5 буде зображена технічна специфікація мікроконтролера Arduino Uno R3.

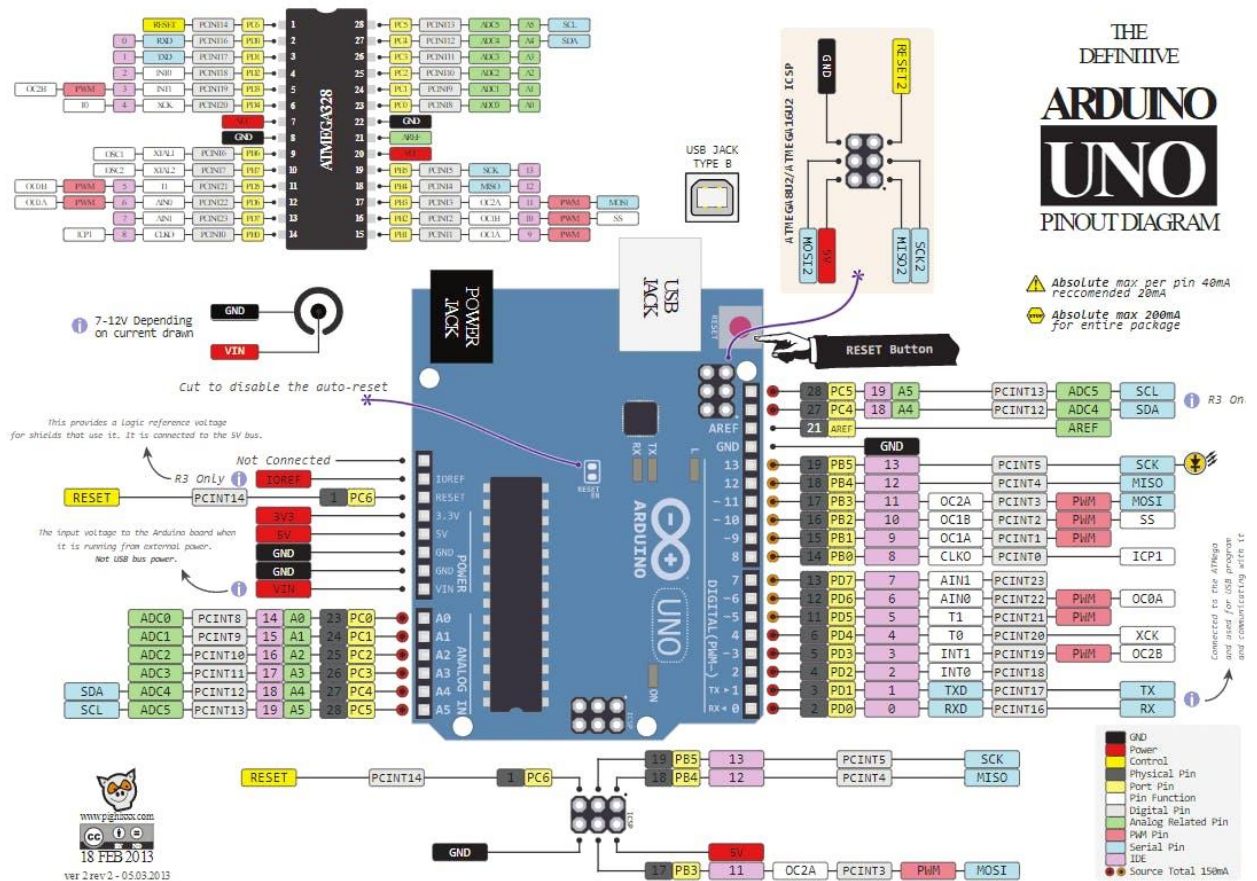


Рисунок 4.5 – Технічна специфікація мікроконтролера Arduino Uno R3

Використання С++ буде незвичайною версією, а адаптованою під Arduino IDE з використанням деяких бібліотек, які полегшують взаємодію з сервоприводом.

Arduino IDE - це середовище розробки, створене для програмування мікроконтролерів Arduino та інших мікроконтролерів різного типу та архітектури [27].

### 4.3 Реалізація тестування системи скиду

Реалізація системи скиду стосується двох основних складових, а саме серводвигун та польотний контролер. В ролі польотного контролера, як описувалось у технічному стеку буде використовуватись Arduino Uno. Схематичне підключення сервоприводу до мікроконтролеру Arduino Uno буде зображено на рисунку 4.6.

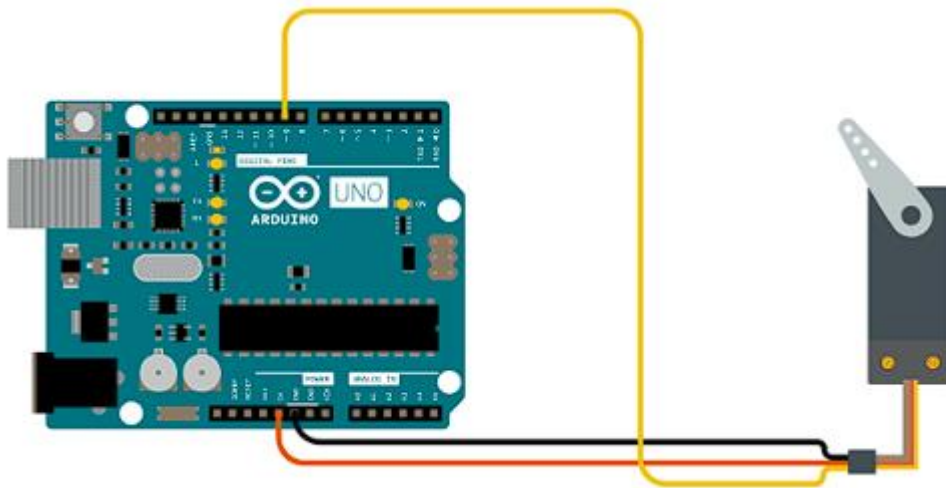


Рисунок 4.6 – Схематичне підключення сервоприводу до Arduino Uno

Для контролювання сервоприводу буде використовуватись бібліотека `Servo.h` [28]. Вона надає зручний інтерфейс для встановлення на визначеному куті сервоприводу та його утримування.

Після приєднання сервоприводу до Arduino Uno, потрібно написаний код вивантажити у мікроконтролер. Цей процес відбувається завдяки Arduino IDE. На рисунку 4.7 буде зображено результат підключення та тестування системи скидання боєприпасу.



Рисунок 4.7 – Результат реалізації системи скидання

На цьому етапі реалізації та розробки системи скидання закінчений в майбутньому його потрібно інтегрувати на польотний контролер та тестувати прямо на FPV-квадрокоптері. Можна переходити до реалізації системи автонаведення.

## 5 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОНАВЕДЕННЯ

### 5.1 Технічний стек системи автонаведення

Реалізація системи автонаведення вимагає комплексного рішення компанії розробників, тому в цій роботі буде представлена лише частина реалізації системи автонаведення. Будь-яка модель штучного інтелекту потребує даних для навчання. Проблема відео, які є у відкритому доступі знищення техніки за допомогою FPV-квадрокоптерів полягає у тому, що якість цих відео передається через аналоговий зв'язок, що надає різноманітні шуми. Система автонаведення буде працювати на самому FPV-квадрокоптері, тобто відео, яке буде поступати на обробку системою автонаведення, буде отримувати відео з гарною якістю. Тому відео, які на даний момент перебувають у мережі не дуже сильно підходять для розробки автонаведення.

Тому для навчання системи було прийняте рішення розробки FPV-симулятора для квадрокоптерів де можливо знищувати різноманітну техніку з маркуванням у статичному положенні та динамічному положенні.

Симулятор надасть змогу моделювати різноманітні ситуації та надає можливість повторювати ці ситуації задля навчання системи автонаведення.

Для розробки FPV-симулятора було прийнято рішення використовувати Unreal Engine 5.3.

Unreal Engine – це потужний інтегрований набір інструментів для розробки ігор та інтерактивних віртуальних середовищ. Розроблений компанією Epic Games [29]. UE5 використовується для створення :

- ігор;
- віртуальної реальності;
- архітектурної візуалізації.

Внутрішньою мовою програмування у UE5 є C++, але він також адаптований під вимоги внутрішнього рушію. Також Epic Games створили високорівневу адаптацію кодування через Blueprint.

Blueprints - це графічний інтерфейс в Unreal Engine, який дозволяє розробникам створювати логіку та взаємодію об'єктів без написання коду на C++. Blueprint система є потужним інструментом для швидкої розробки.

На базі цих засобів розробки буде проводитись реалізація FPV-симулятора для системи автонаведення. Також слід зазначити, що на момент написання кваліфікаційної роботи, аналогів подібного симулятора немає, тому цей програмний продукт також може використовуватись для навчання FPV-операторів, для розуміння механік квадрокоптеру та знищення тієї чи іншої техніки з покращенням своїх навичок.

## 5.2 Опис компонентів FPV-симулятора для системи автонаведення

Реалізація FPV-симулятора для системи автонаведення не входить у проєктну частину через те, що розуміння потрібності FPV-симулятора прийшло саме на етапі реалізації системи автонаведення. Тому для зображення компонентів основного рівня FPV-симулятора буде зображено діаграму компонентів на рисунку 5.1.

Діаграма компонентів ділиться на декілька частин де першою частиною є геймплейна частина FPV-квадрокоптеру. Ця частина відповідає за керування FPV-квадрокоптеру емуляції його руху та ініціалізації. Головний клас FPV-квадрокоптеру успадкований він класу який надає UE5 для успадковування, а саме пішак. Цей тип класу може бути інтегрований до гейммоду, який інтегрований у рівень. Також пішак отримує події з системи імпутів та реагує відносно них.

Для забезпечення фізичної поведінки FPV-квадрокоптеру, було використано моторні частини, які розташовані на позиції двигунів. Саме ці частини дають імпульс для польоту.

HUD відповідає за UI усього симулятора, він є загальним хабом для різноманітних віджетів [31].

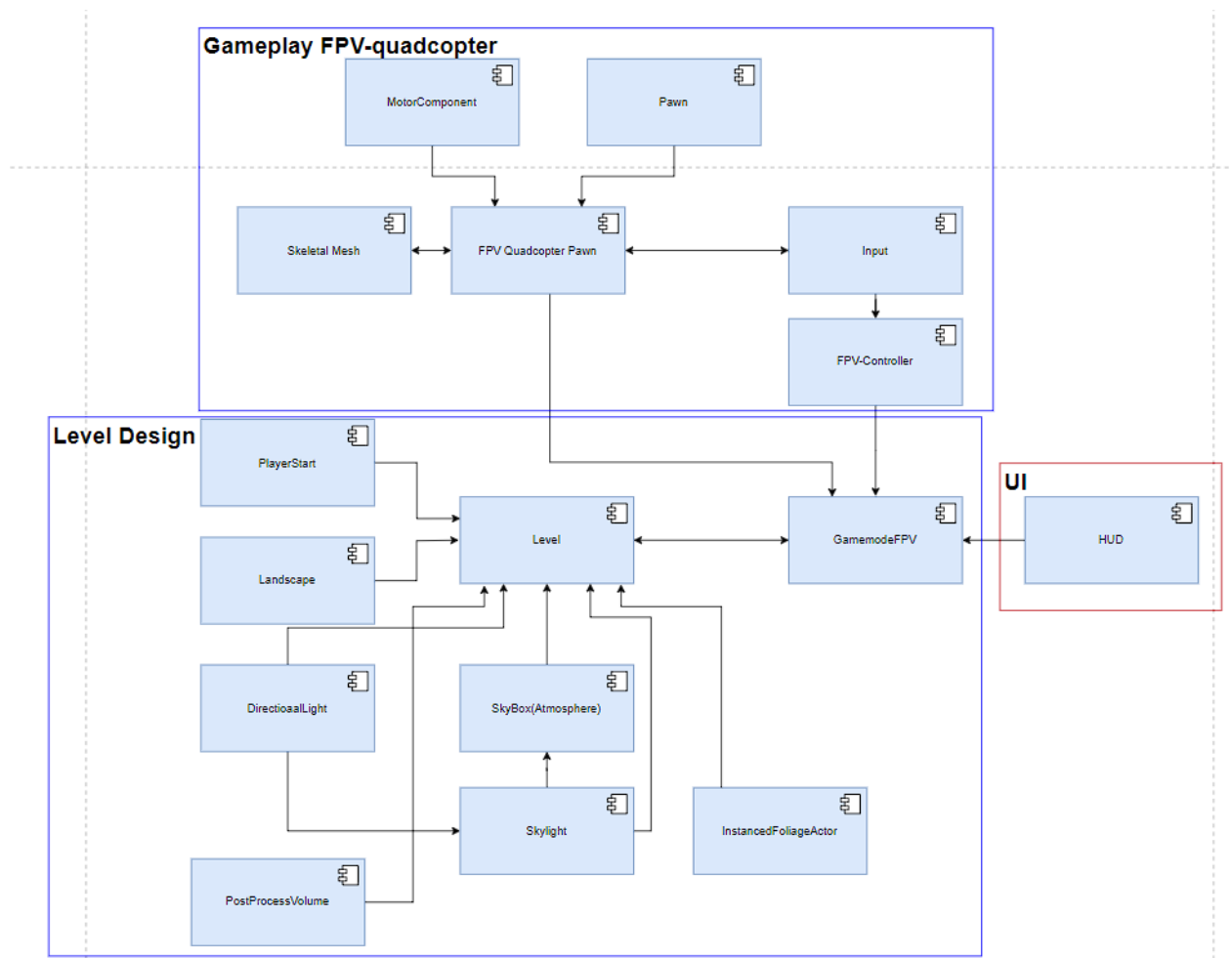


Рисунок 5.1 – Діаграма компонентів FPV-симулятора

Дизайн рівню включає у себе всі геймплейні складові та деяких акторів, які розташовані на карті та відповідають за деякий функціонал. Основними такими акторами є позиція створення пішака ця позиція є початковою при запуску рівня та його завантаження. Для емуляції атмосфери був використаний клас *Skybox*, який надає налаштування для зображення неба та горизонту бачення. Для створення дерев, кущів, доріг та інших статичних елементів на карті було використано *FoliageActor*, який вбудований у UE5 та надає функціонал розташування елементів на карті, які доповнюють антураж місцевості.

Також слід зазначити, що елементи та частини рівню змінюються в залежності від вимог. Наприклад для реалізації головного меню, буде використовуватись інший рівень та іншу геймплейну складову разом з UI.

### 5.3 Розробка FPV-квадрокоптеру у FPV-симуляторі

Розробка FPV-квадрокоптеру складається з компонентної бази FPV-квадрокоптеру та його функцій. Компонентна складова складається з:

- тіло квадрокоптеру, яке відповідає за його форму та вигляд;
- моторів, які розташовані на тілі квадрокоптеру;
- камера, яка буде розташована на передній частині квадрокоптеру;
- ефект руйнування при зіткненні.

Результат створення FPV-квадрокоптеру буде зображено на рисунку 5.2.



Рисунок 5.2 – Об'єднана компонентна складова FPV-квадрокоптеру

Функціональна складова FPV-квадрокоптеру складається з реакції на визначені події. Перша подія відповідає за момент створення пішака FPV-квадрокоптеру тут отримується об'єкт класу позиції старту та

встановлюється позиція спаму пішака. Також в цій події ініціалізуються деякі елементи UI, які напряму зв'язані з FPV-квадрокоптером та його положенням. Друга подія відповідає за зіткнення FPV-квадрокоптеру з об'єктом ураження або будь-яким іншим об'єктом. Ця подія деактивує головного пішака квадрокоптера та переводить погляд на загальну камеру, яка відображає результат потрапляння FPV-квадрокоптеру. Ця камера надає користувачу можливість запустити наступний FPV-квадрокоптер. Під новим запуском функціонально пішак переноситься на позицію спаму та переходить в активний режим.

Наступний підрозділ буде стосуватись контролювання FPV-квадрокоптеру.

#### 5.4 Розробка контролю FPV-квадрокоптеру у FPV-симуляторі

Контроль FPV-квадрокоптеру у симуляторі повинен підтримувати декілька методів. В першу чергу повинна бути підтримка RC пультів, які використовуються для реального контролювання FPV-квадрокоптером. На рисунку 5.3 зображений приклад RC-пульту, а саме Radiomaster TX12 [32].



Рисунок 5.3 – RC пульт Radiomaster RX12

Саме на цій моделі буде проводитись тестування керування FPV-квадрокоптеру у симуляторі. Проблема таких типів пульта полягає у тому що в них немає чіткої стандартизації кнопок та важелів. Тому кожен пульт потрібно підлаштовувати перед входом до симулятора. Також UE5 не може зчитувати вхідні дані з пульта. Для зчитування інформації або отримання інформації з пульта був використаний плагін RAW Input.

RAW Input означає отримання даних введення безпосередньо від пристрою введення, не обробляючи їх операційною системою або іншими проміжними рівнями. Це дозволяє отримати більш точні та негаяні дані введення, оскільки вони не проходять через всі шари операційної системи або драйвери [33].

Також був частково реалізований метод контролювання через геймпад. Для цього пристрою використовується звичайний вхід, так як більшість геймпадів зроблені за визначеними стандартами.

Для контролювання було використано декілька подій, а саме:

- подія увімкнення та вимкнення двигунів, можливе використання прямо при польоті;
- подія зміна нахилу FPV-квадрокоптеру;
- подія зміни крену FPV-квадрокоптеру;
- подія зміни повороту FPV-квадрокоптеру;
- подія зміни газу FPV-квадрокоптеру.

Кожна з цих подій напряму впливає на пересування та позиції FPV-квадрокоптеру у просторі рівню.

### 5.5 Розробка ШІ для техніки у FPV-симуляторі

Для того, щоб збільшити реалістичність ураження техніки ця техніка повинна рухатись по визначених дорогах на карті. В першу чергу ШІ потребує актора або пішака, який буде використовуватись для переміщення на карті. Для цього було обрано декілька військових моделей військової техніки противника, а саме:

- BMP2 як динамічна модель;
- MTLB як статична модель;
- MLRS Grad 21 як динамічна модель, яка може стріляти;
- T72 та T55 як динамічна модель, яка може стріляти.

Емуляція фізики цієї техніки була зроблена за допомогою плагіну ChaosVehiclePlugin.

ChaosVehiclePlugin – це легка система Unreal Engine 5 для симуляції фізики транспортних засобів. Приєднання цього плагіну дозволяє досить просто приєднати фізику в якій можна прописати максимальну швидкість або вагу техніки [34]. Також система надає можливість коригувати налаштування двигуна та кількості КПП з максимальними оборотами. На рисунку 5.4 представлено приклад вписування даних для BMP2.

Для пересування по місцевості, потрібно створити місцевість з дорогами. Для формування системи доріг на карті було взято за основу систему Spline [35]. Цей інструмент дозволяє прокласти дороги та підлаштувати оточення під ці дороги. Результат додавання польової дороги для військової техніки використовуючи Spline буде зображено на рисунку 5.5.

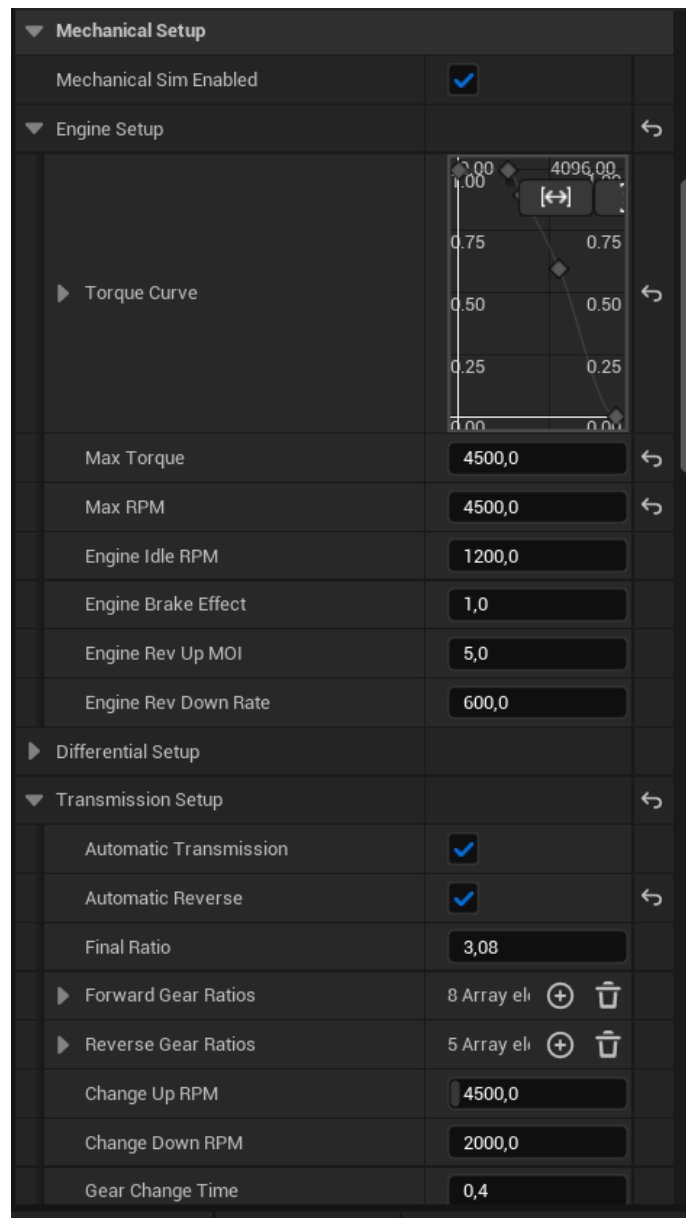


Рисунок 5.4 – Налаштування фізики військової техніки



Рисунок 5.5 – Додавання польової дороги для військової техніки

На цьому ж інструменті буде прокладений шлях з акторів, які будуть мати свій Spline, тобто для прокладання шляху на карті потрібна зв'язка акторів, а саме точок на які штучний інтелект буде спиратись при пересуванні на карті. Принцип дії буде полягати з пошуку найближчого Spline на карті та пересуванням у його сторону. На рисунку 5.6 буде зображена дорога, де проводилось тестування з пересуванням різноманітної військової техніки.

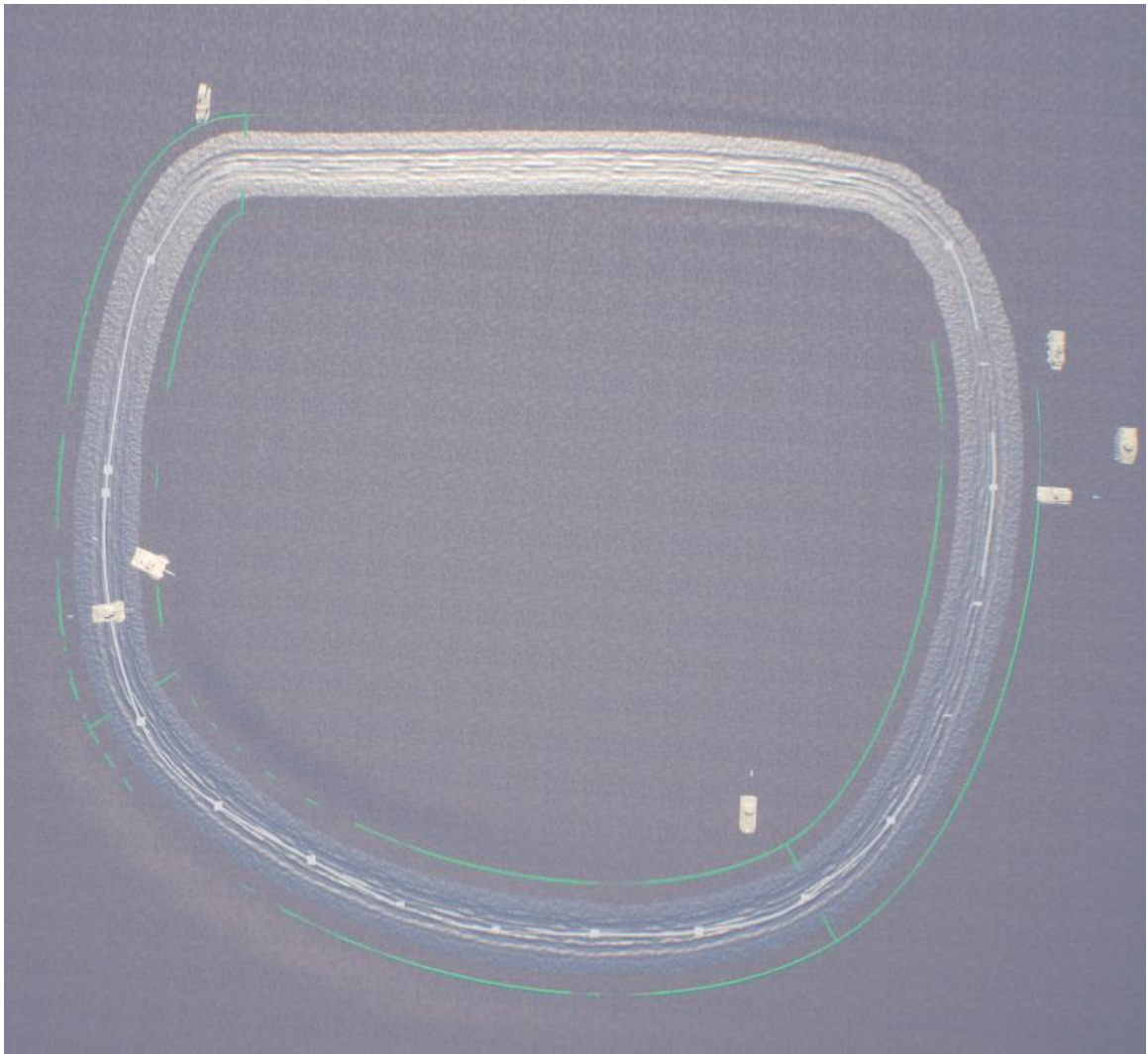


Рисунок 5.6 – Тестова дорога зі Spline для тестування техніки

В кінці цього етапу, військову техніку можна додавати на будь-яку карту з прокладанням визначеного маршруту, що надає можливість створення різноманітних карт та додавання військової техніки для ураження при динамічному русі, що чудово підходить для емуляції та навчання системи автонаведення.

Також слід зазначити, що пересування військової техніки відбувається природньо через використання плагіну для емуляції фізики військової техніки.

## 5.6 Розробка головного меню та UI

Для взаємодії з різними рівнями FPV-симулятора було прийняте рішення створити головне меню з можливістю змінювати налаштування графіки та інших внутрішніх характеристик гравального рушія. На рисунку 5.7 буде зображено головне меню FPV-симулятора.



Рисунок 5.7 – Головне меню FPV-симулятора

У налаштуваннях також планується кастомізація RC пульту для встановлення потрібних значень на момент написання цього функціоналу, ще немає.

Для покращення роботи FPV-симулятора на комп'ютерах з низькими технічними характеристиками було додано можливість змінювати якість графіки та текстур, які використовуються. Також можлива зміна дистанції бачення деяких типів акторів, які розташовані на карті. На рисунку 5.8 буде зображено вигляд налаштування графіки.



Рисунок 5.8 – Налаштування графіки

Усі рівні, які будуть розроблятися будуть знаходитись у розділі компанія. Там користувач FPV-симулятора повинен обрати потрібен рівень, після чого відбувається перехід на цей рівень.

Це досить важливо для системи автонаведення, тому що якщо навчати систему на одному рівні вона може перевчитись, тому потрібно використовувати різноманітні ситуації, локації та військову техніку для якісного навчання ШІ.

На момент написання існує два рівні:

-перший рівень стосується добивання покинутої військової техніки у разі невдалого штурму;

-другий рівень стосується пошуку та ураження динамічної військової техніки, а саме артилерійської установки град, яка прямує на позицію для удару.

На рисунку 5.9 буде зображено частину меню вибору потрібного рівня.

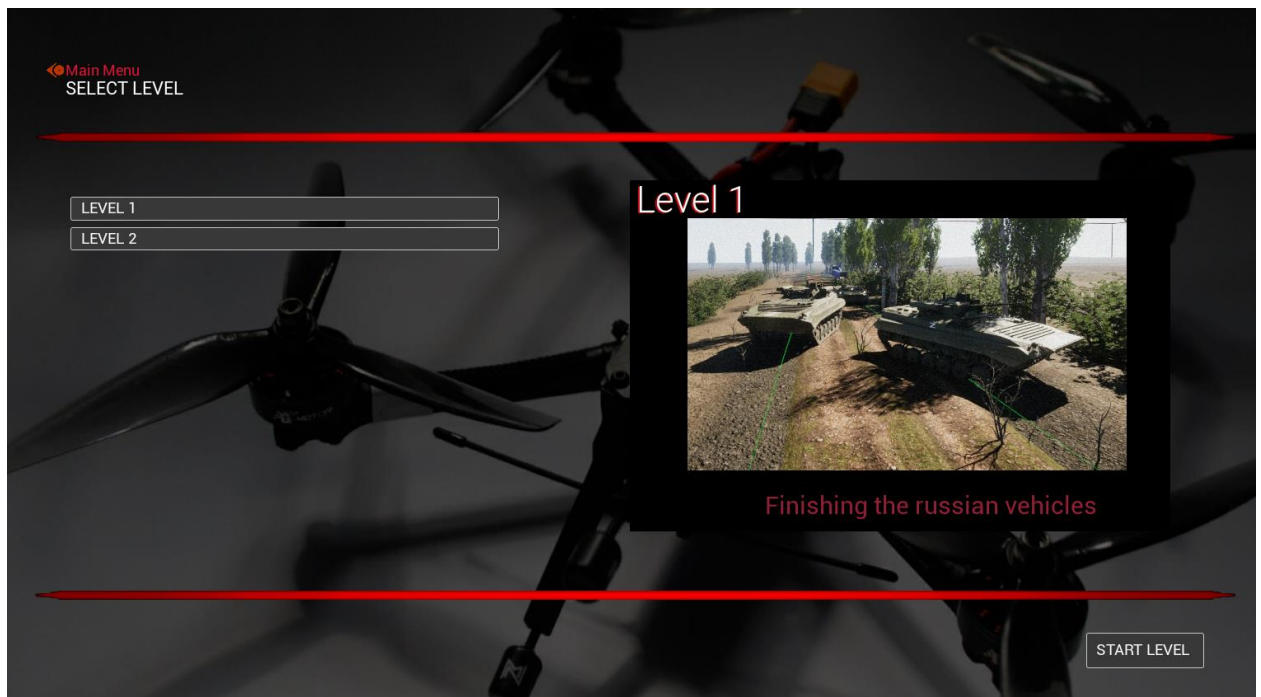


Рисунок 5.9 – Меню вибору рівня

На цьому етапі частина головного меню закінчена, наступний етап полягає у реалізації UI для FPV-квадрокоптеру, зображення його швидкості та бажано зобразити позиції ричагів керування для розуміння системи автонаведення, як саме керувати FPV-квадрокоптером.

FPV-квадрокоптери можуть літати у декількох режимах, але основними є акробатичний та кутовий. При акробатичному режимі FPV-квадрокоптер має змогу перевертатись та повторювати точні рухи від оператора FPV. При кутовому режимі FPV-квадрокоптер може нахилитись при польоті лише на 75 градусів відносно горизонту. Цей режим зазвичай використовуються на початку польоту для стабілізації та більше безпечного підняття у повітря. Також цей режим можуть використовувати новачки для того, щоб не впасти на акробатичному режимі там де це не потрібно. Для FPV-операторів та їх навчання було додано емуляцію роботи РЕБ та втрату сигналу при відльоті занадто далеко.

На рисунку 5.10 буде зображено загальний вигляд UI для FPV-квадрокоптеру.

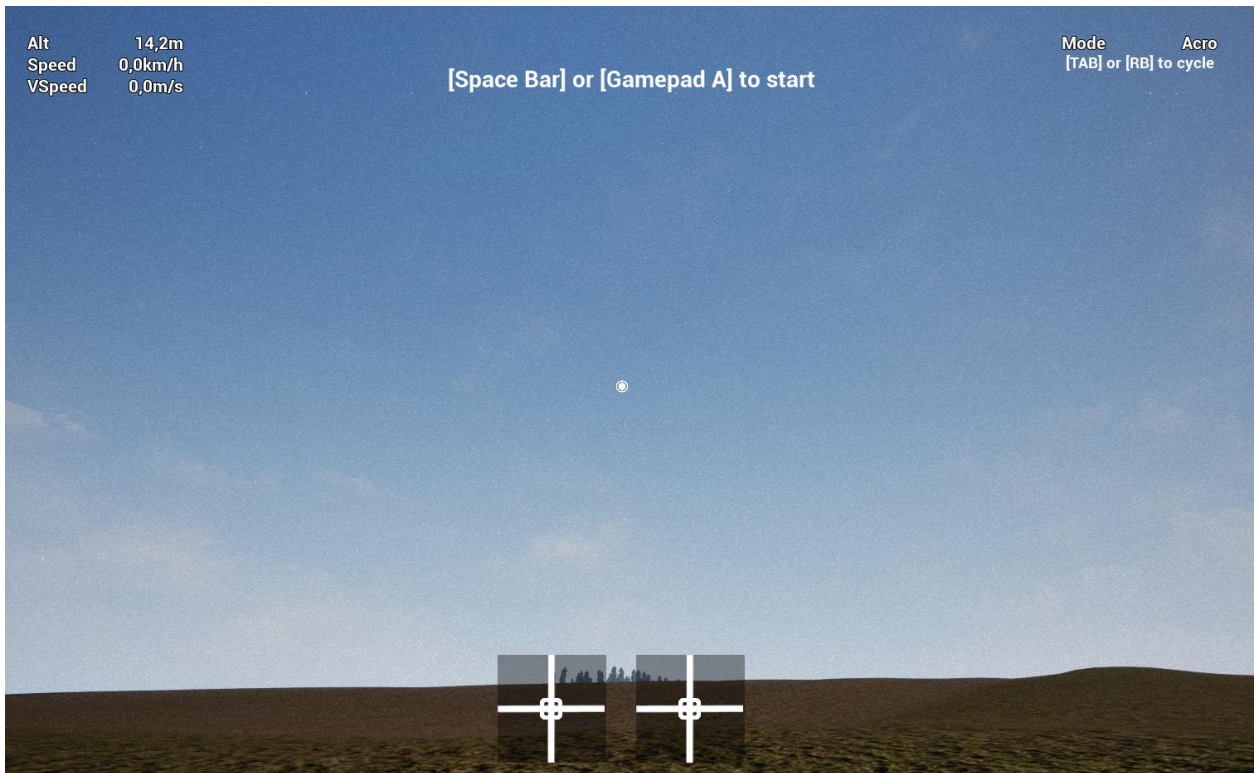


Рисунок 5.10 – Загальний вигляд інтерфейсу для FPV-квадрокоптеру

Цей етап є достатнім для навчання системи автонаведення за FPV-симулятором, але в майбутньому потрібно додати паузу для виходу у меню та зміни рівню.

## ВИСНОВКИ

В результаті розробленої кваліфікаційної роботи було створено архітектуру FPV-квадрокоптеру та його підсистем з реалізацією прототипу для системи скидання та FPV-симулятора для реалізації тестових даних та кращого навчання ШІ.

При розробці архітектури FPV-квадрокоптеру та загальному баченні у першому розділі майбутньої архітектури були описані такі підсистеми як система автонаведення та система скидання. На даний момент FPV-квадрокоптери використовують більше в режимі камікадзе, тобто якщо FPV-квадрокоптер було запущено для ураження тієї чи іншої цілі він більше ніколи не повернеться. При додаванні системи скидання з'являється опція з поверненням, але з цим можуть виникнути деякі проблеми.

Перша проблема полягає у тому що боєприпас, який встановлюється на FPV-квадрокоптер стає по факту замінований, та при мінімальному контакті він підривається.

Для вирішення цієї проблеми бажано використовувати детонатор, який контролюється з польотного контролера FPV-квадрокоптеру та забезпечує безпеку при поверненні FPV-квадрокоптеру.

На даний момент з описаною архітектурою процес повернення FPV-квадрокоптеру відбувається через скидання боєприпасу в момент повернення. Безумовно це краще ніж втрата усього разом з снарядом, але куди краще зберегти обидва елементи.

Другою проблемою полягає у радіусі дії, а саме робота акумулятору. Зазвичай FPV-квадрокоптери запускають в одну сторону та їх час польоту розраховується саме з бойовою частиною. Зі системою скиду радіус дії в режимі скиду може бути обмежений для залишку заряду для повернення FPV-квадрокоптеру назад на позицію.

Третьою проблемою є те, що якщо FPV-квадрокоптер був помічений, та повертається назад на позицію FPV-операторів, то це загроза для їхнього

життя. Тому бажано мати точку або точки куди FPV-квадрокоптер повинен сісти та потім через деякий час забрати FPV-квадрокоптер з безпечної позиції.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. FPV-квадрокоптер URL: <https://frameworkfilms.net/facts/fpv-drone-build> (дата звернення: 05.09.2023).
2. Система скидання URL: <https://device.report/manual/4601537> (дата звернення: 06.09.2023).
3. Система наведення: URL: <https://www.mdpi.com/2226-4310/10/1/82> (дата звернення: 21.09.2023).
4. ТМ-62: URL: <https://ictech.com.ua/en/2020/12/28/2293/> (дата звернення: 30.09.2023).
5. ВОГ-17: URL: <https://www.ukrmilitary.com/2020/09/vog-17v.html> (дата звернення: 02.10.2023).
6. РГД-5: URL: <https://www.ukrmilitary.com/2020/08/rgd5.html> (дата звернення: 10.10.2023).
7. Т7263: URL: <https://sprotyv.mod.gov.ua/slabki-mistsya-rosijskoyi-bronetehniku/> (дата звернення: 25.10.2023).
8. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ FPV-КВАДРОКОПТЕРІВ ТА ПОДАЛЬШИЙ ЇХ РОЗВИТОК. URL: <https://archive.liga.science/index.php/conference-proceedings/issue/view/ukr-17.11.2023>
9. АТАМ. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/architecture-tradeoff-analysis-method-atam/> (дата звернення: 28.10.2023)
10. Стейкхолдери системи. URL: <https://www.investopedia.com/terms/s/stakeholder.asp#:~:text=A%20stakeholder%20is%20a%20party,employees%2C%20customers%2C%20and%20suppliers> (дата звернення: 29.10.2023)
11. Функціональні вимоги. URL: <https://www.altexsoft.com/blog/functional-and-non-functional-requirements-specification-and-types/>. (дата звернення: 30.10.2023)
12. Обмеження системи. URL: <https://www.ibm.com/docs/en/storage-scale/4.2.2?topic=troubleshooting-understanding-system-limitations> (дата звернення: 02.11.2023)

13. 4+1 URL: <https://sitharabandara.medium.com/4-1-architectural-view-model-9ffe2bcf28a2> (дата звернення: 03.11.2023)
14. ШИМ сигнал URL: <https://bitkit.com.ua/chto-takoe-shim-shirotno-impulsnaya-modulyaciya> (дата звернення: 05.11.2023)
15. SpeedyBee f405 v3 Stack URL: [https://hobbymania.com.ua/file/SpeedyBee\\_F405\\_V3\\_Stack.pdf](https://hobbymania.com.ua/file/SpeedyBee_F405_V3_Stack.pdf) (дата звернення: 10.11.2023)
16. XING2 URL: <https://shop.iflight-rc.com/image/catalog/product/XING2-2207/2207-1855KV.jpg> (дата звернення: 11.11.2023)
17. Mark4 URL: [https://flymod.net/item/readytosky\\_mark4\\_7\\_295](https://flymod.net/item/readytosky_mark4_7_295) (дата звернення: 11.11.2023)
18. VTX TX800 URL: <https://www.racedayquads.com/products/speedybee-tx800-20x20-25-800mw-5-8ghz-vtx-ммсх> (дата звернення: 11.11.2023)
19. Foxeer micro Cat 3 URL: <https://www.flyingtech.co.uk/fpv-camera-gimbals/foxeer-micro-cat-3-1200tv1-super-low-light-night-camera> (дата звернення: 13.11.2023)
20. Radiomaster rp3 URL: <https://www.radiomasterrc.com/products/rp3-expresslrs-2-4ghz-nano-receiver> (дата звернення: 13.11.2023)
21. MG90S URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132104/ETC2/MG90S.html> (дата звернення: 14.11.2023)
22. PETG URL: <https://www.acmeplastics.com/what-is-petg#:~:text=Polyethylene%20terephthalate%20glycol%2C%20commonly%20known,to%20its%20low%20forming%20temperatures.> (дата звернення: 30.11.2023)
23. Customizable Servo Adapter URL: <https://www.thingiverse.com/thing:4653000> (дата звернення: 02.12.2023)
24. Сервозахват URL: <https://www.thingiverse.com/thing:2302957> (дата звернення: 02.12.2023)
25. C++ URL: [https://www.w3schools.com/cpp/cpp\\_intro.asp#:~:text=C%2B%2B%20is%20a%20cross%2Dplatform,over%20system%20resources%20and%20memory.](https://www.w3schools.com/cpp/cpp_intro.asp#:~:text=C%2B%2B%20is%20a%20cross%2Dplatform,over%20system%20resources%20and%20memory.) (дата звернення: 10.12.2023)

26. Arduino UNO URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3> (дата звернення: 15.12.2023)
27. Arduino IDE URL: <https://docs.arduino.cc/> (дата звернення: 16.12.2023)
28. Servo URL: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/servo/> (дата звернення: 20.12.2023)
29. UE5 URL: <https://www.unrealengine.com/en-US> (дата звернення: 22.12.2023)
30. Blueprints URL: <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/ProgrammingAndScripting/Blueprints/GettingStarted/> (дата звернення: 25.12.2023)
31. HUD URL: <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/InteractiveExperiences/Framework/UIAndHUD/> (дата звернення: 28.12.2023)
32. Radiomaster TX12 URL: <https://www.radiomasterrc.com/pages/user-manuals> (дата звернення: 02.01.2024)
33. RAW Input URL: <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/InteractiveExperiences/Input/RawInput/> (дата звернення: 02.01.2024)
34. Chaos Vehicles URL: <https://docs.unrealengine.com/4.26/en-US/InteractiveExperiences/Physics/ChaosPhysics/ChaosVehicles/> (дата звернення: 05.01.2024)
35. Spline URL: <https://docs.unrealengine.com/5.0/en-US/blueprint-splines-in-unreal-engine/> (дата звернення: 05.01.2024).