

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації  
та робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Розроблення безпілотної робототехнічної мобільної платформи  
для гуманітарної допомоги  
(тема)

Виконав:

Здобувач 2 року навчання,  
групи КІТПВм-23-3

Греков Микита Сергійович  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 174 Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології  
та робототехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані  
технологічні процеси і виробництва  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. Жарікова І. В.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Невлюдов І. Ш.  
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Я, Греков Микита Сергійович, як здобувач ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

« 22 » січня 2025р.



Греков М. С.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра Комп'ютерно-інтегровані технології, автоматизації та робототехніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані та технології  
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Грекову Микиті Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення безпілотної робототехнічної мобільної платформи для гуманітарної допомоги

затверджена наказом університету від 22.11.2024 р. № 1231Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 22 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

3.1 Вантажопідйомність – до 5 кг;

3.2 Дальність польоту – до 20 км;

3.3 Тривалість польоту – до 30 хв;

3.4 Максимальна швидкість – 50 км/год;

3.5 Виконати розрахунок динамічних параметрів двигуна;

3.6 Провести симуляцію експлуатаційних навантажень на розроблену конструкцію.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

4.1 Аналіз вимог до безпілотної платформи для гуманітарної допомоги;

4.2 Розробка концепції та конструкції БПЛА-октокоптера;

4.3 Вибір компонентів для апаратної частини БПЛА;

4.4 Моделювання та симуляція роботи платформи;

4.5 Оцінка ефективності та надійності платформи;

4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) \_\_\_\_\_  
Демонстраційний матеріал у форматі презентації PowerPoint.

---

---

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ та аналіз технічного завдання	12.10.24 – 14.10.24	Виконав
2	Класифікація БПЛА за призначенням і можливостями	14.10.24 – 15.10.24	Виконав
3	Аналіз гуманітарних і медичних застосувань БПЛ	18.10.24 – 29.10.24	Виконав
4	Огляд програмного забезпечення для створення цифрової моделі	29.10.24 – 02.11.24	Виконав
5	Вибір типу рами та створення 3D-моделі октокоптера	04.11.24 – 15.11.24	Виконав
6	Аналіз компонентів апаратної частини октокоптера	16.11.24 – 28.11.24	Виконав
7	Розрахунки динамічних параметрів двигуна	29.11.24 – 14.12.24	Виконав
8	Симуляція навантажень у 3D-моделі	15.12.24 – 23.12.24	Виконав
9	Оформлення пояснювальної записки	24.12.24 – 12.01.25	Виконав
10	Подання роботи на перевірку керівнику	13.01.25	Виконав
11	Подання роботи на нормоконтроль	17.01.25	
12	Подання роботи до Екзаменаційної комісії	22.01.25	
13			

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 06.09.2024 р. \_\_\_\_\_

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Греков М. С.  
(прізвище, ініціали)

доц. каф. Жарікова І. В.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 85 с., 3 табл., 43 рис., 1 дод., 24 джерела.

БПЛА, ГУМАНІТАРНА ДОПОМОГА, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ,  
МОДЕЛЮВАННЯ, ТАУ, САУ.

Мета роботи – розробити безпілотну робототехнічну мобільну платформу, оптимізовану для надання гуманітарної допомоги в умовах обмеженого доступу або надзвичайних ситуацій.

Об’єкт дослідження – процес розроблення БПЛА для гуманітарної допомоги.

Предмет дослідження – конструкція БПЛА для гуманітарної допомоги.

Проведено аналіз літературних джерел щодо розробки 3D-моделей безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та функціональних можливостей програмного забезпечення Autodesk Fusion 360. Виконано класифікацію БПЛА за призначенням та технологічними характеристиками, а також аналіз можливостей їх гуманітарного та медичного використання. Здійснено вибір компонентів апаратної частини октокоптера, включаючи двигуни, сенсори, джерела електроживлення та процесор керування. Розроблено структурну схему функціонування октокоптера з використанням восьми пропелерів, створено 3D-модель апарата, виконано розрахунок динамічних параметрів двигуна, побудовано функціональну схему системи автоматичного управління двигунами, а також отримано амплітудно-частотну та фазо-частотну характеристики. Проведено симуляцію експлуатаційних навантажень для оцінки роботи октокоптера. Усі дослідження узгоджено з цілями сталого розвитку, зокрема спрямовано на покращення доступу до медичної допомоги (ЦСР 3) та розвиток інноваційної інфраструктури (ЦСР 9).

## **ABSTRACT**

Explanatory note: 85 p., 3 tables, 43 figures, 1 appendix, 24 sources(a).

UAV, HUMANITARIAN AID, SOFTWARE, MODELING, TAU, ACS.

The purpose of the research is to develop an unmanned robotic mobile platform optimized for providing humanitarian assistance in conditions of limited access or emergencies.

The object of development is the process of developing a UAV for humanitarian assistance.

The subject of development is the design of a UAV for humanitarian assistance.

An analysis of literary sources on the development of 3D models of unmanned aerial vehicles (UAVs) and the functionality of the Autodesk Fusion 360 software was conducted. UAVs were classified according to their purpose and technological characteristics, as well as an analysis of the possibilities of their humanitarian and medical use. The components of the octocopter hardware were selected, including engines, sensors, power supplies and a control processor. A structural diagram of the octocopter using eight propellers was developed, a 3D model of the device was created, the dynamic parameters of the engine were calculated, a functional diagram of the automatic engine control system was built, and amplitude-frequency and phase-frequency characteristics were obtained. A simulation of operational loads was carried out to assess the operation of the octocopter. All studies are consistent with the goals of sustainable development, in particular, they are aimed at improving access to health care (SDG 3) and developing innovative infrastructure (SDG 9).

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Класифікація дронів за призначенням та технологічними можливостями..	13
1.1 Аналіз технічного завдання .....	13
1.1.1 Вимоги до конструкції .....	13
1.1.2 Комплектуючі БПЛА .....	15
1.1.3 Вибір матеріалів .....	16
1.1.4 Економічна та екологічна обґрунтованість .....	17
1.2 Класифікація БПЛА .....	19
1.2.1 Види БПЛА за призначенням .....	21
1.2.2 Технічні можливості БПЛА .....	25
1.3 Технічні вимоги до БПЛА для гуманітарних місій.....	26
1.4 Потенційне гуманітарне та медичне використання БПЛА.....	28
1.4.1 Дрібномасштабне аварійне картування .....	29
1.4.2 Пошук постраждалих під завалами .....	29
1.4.3 Логістика та екстрена доставка медичного приладдя та обладнання ..	30
1.4.4 Гуманітарні безпілотники над зонами конфліктів .....	30
1.5 Огляд і вибір програмного забезпечення для створення цифрової моделі БПЛА для гуманітарної допомоги .....	31
1.5.1 Програмне забезпечення SolidWorks Software.....	31
1.5.2 Програмне забезпечення Blender Software .....	33
1.5.3 Програмне забезпечення CATIA Software.....	35
1.6 Autodesk Fusion 360 Software як програмне забезпечення для побудови 3D-моделі БПЛА для гуманітарної допомоги.....	37
1.7 Висновки до першого розділу .....	39
2 Вибір та моделювання конструкції розроблюваного бпла .....	41
2.1 Типи рам БПЛА.....	41
2.1.1 Трикоптери.....	41
2.1.2 Квадрокоптер.....	42

2.1.3 Гекстакоптер .....	43
2.1.4 Конструкція Y6.....	44
2.1.5 Октокоптер .....	45
2.1.6 Конструкція X8.....	46
2.1.7 Октокоптер для гуманітарної допомоги .....	47
2.2 Створення 3D-моделі БПЛА у Autodesk Fusion 360 Software .....	47
2.3 Заходи з безпеки життєдіяльності та екології для безпілотних літальних апаратів.....	51
2.4 Висновки до другого розділу.....	53
3 Вибір компонентів апаратної частини октокоптера .....	54
3.1 Компонування коптера .....	54
3.1.1 Двигун T-MOTOR 2207 .....	54
3.1.2 Сенсори.....	58
3.1.3 Електроживлення октокоптера.....	60
3.1.4 Головний процесор до октокоптера.....	61
3.2 Висновки до третього розділу .....	63
4 Розрахунок динамічних параметрів двигуна .....	64
4.1 Опис функціонування системи керування БПЛА .....	64
4.2 Основні параметри моделі .....	68
4.3 Розрахунки двигуна T-MOTOR 2207 1950KV .....	70
4.4 Симуляція навантажень для 3D-моделі БПЛА .....	76
4.5 Висновки до четвертого розділу .....	80
Висновки .....	81
Перелік джерел посилання .....	83
Додаток А Апробація результатів .....	86
Додаток Б Демонстраційний матеріал .....	97

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АКБ – акумуляторна батарея;

БАС – безпілотна авіаційна система;

БПЛА – безпілотний літальний апарат;

ПЗ – програмне забезпечення;

САПР – система автоматизованого проєктування;

ТЗ – технічне завдання;

ХНУРЕ – Харківський національний університет радіоелектроніки;

ЧПУ – числове програмне управління.

## ВСТУП

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) поступово стають незамінними в різних сферах життя, розширюючи горизонти технологічного прогресу. У сільському господарстві вони використовуються для запилення полів, також відіграють важливу роль у доставці ліків та гуманітарної допомоги, а їх застосування для моніторингу інфраструктури, такої як електролінії та трубопроводи, сприяє підвищенню безпеки та ефективності робітників, які тепер можуть уникати небезпечних зон, і знижує час та вартість обслуговування, роблячи моніторинг інфраструктури більш ефективним.

Виробники БПЛА постійно вдосконалюють свої моделі, що дозволяє їм майже непомітно збирати інформацію про різні об'єкти, включаючи людей, групи або території, пов'язані з інтересами компаній. Однак з розширенням можливостей безпілотників зростає і проблема їх використання в небезпечних цілях. Використання БПЛА для шпигунства, атак або вторгнень становить загрозу безпеці приватних осіб, підприємств та державних установ, а також їх конфіденційності. Дрони можуть використовуватися для незаконного спостереження за людьми, крадіжки конфіденційних даних компаній чи збору розвідувальної інформації, що може порушувати права на приватність і ставити під загрозу державну або корпоративну таємницю.

Державні органи та компанії, що займаються розробкою БПЛА, активно працюють над створенням технологій для ідентифікації та нейтралізації потенційно небезпечних безпілотників. Виробники також зосереджені на розвитку рішень, що запобігають зловживанням БПЛА. Це підкреслює важливість збалансованого підходу до регулювання та використання таких технологій для гарантування безпеки та захисту приватного життя.

Незважаючи на позитивні аспекти, БПЛА також можуть бути задіяні у військових операціях або незаконній діяльності, включаючи тероризм, шпигунство, крадіжку інформації, вандалізм, порушення повітряного

простору та логістику заборонених вантажів. Це вимагає розробки ефективних методів протидії неправомірному використанню безпілотників.

Зростання природних та техногенних загроз, а також потреба в оперативній гуманітарній допомозі, зокрема в Україні, підкреслюють необхідність розвитку потужної системи моніторингу та швидкого реагування. Ключовим елементом цієї системи є авіаційна підтримка, включно з безпілотними авіаційними системами (БАС). Завдяки БАС, які можуть безпечно та оперативно доставляти гуманітарну допомогу, медикаменти, воду та інші ресурси до постраждалих регіонів, ефективність гуманітарних операцій значно зростає.

В умовах надзвичайних ситуацій БАС дозволяють оперативно оцінювати масштаби катастроф, доставляти рятувальників або критично важливі вантажі у віддалені та важкодоступні райони, а також передавати дані в реальному часі для координації подальших дій. Однак в Україні такі системи застосовуються поки що експериментально, переважно через адміністративні обмеження. Удосконалення законодавчої бази дозволить інтегрувати БАС у сферу гуманітарної допомоги та надзвичайного реагування, забезпечивши відповідність міжнародним стандартам.

Мета роботи – розробити безпілотну робототехнічну мобільну платформу, оптимізовану для надання гуманітарної допомоги в умовах обмеженого доступу або надзвичайних ситуацій.

Об'єкт дослідження – процес розроблення БПЛА для гуманітарної допомоги.

Предмет дослідження – конструкція БПЛА для гуманітарної допомоги.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технічне завдання;
- проаналізувати літературу за темою роботи;
- проаналізувати етапи розробки БПЛА;
- вибрати програмне забезпечення для моделювання БПЛА;
- створити цифрову 3D-модель БПЛА для гуманітарної місії;

- обрати комплектуючі для двигуна;
- провести тестування розробленої моделі.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008-15 [1], керуючись навчальним посібником з дипломного проектування [2], враховано принципи та завдання, що відповідають Цілям сталого розвитку (ЦСР), зокрема, спрямовані на досягнення сталого економічного, соціального та екологічного розвитку, а результати кваліфікаційної роботи отримали апробацію в збірнику кафедри КІТАР АДЕД-2024(2) [3] (Додаток А).

# 1 КЛАСИФІКАЦІЯ ДРОНІВ ЗА ПРИЗНАЧЕННЯМ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МОЖЛИВОСТЯМИ

## 1.1 Аналіз технічного завдання

Метою проєкту є створення конструкції БПЛА, оптимізованої для гуманітарних операцій, зокрема для доставки медичних засобів, продуктів, води та інших життєво важливих ресурсів у зони надзвичайних ситуацій. БПЛА має бути легким у керуванні, витривалим та ефективним у використанні ресурсів.

### 1.1.1 Вимоги до конструкції

БПЛА має бути компактним, достатньо легким для транспортування в зону надзвичайної ситуації. Важливо передбачити можливість складання конструкції або її окремих компонентів, що зменшить об'єм для транспортування. Використання легких матеріалів, таких як вуглепластик, композити, алюміній або інші матеріали з високою міцністю при низькій вазі. Це забезпечує менше споживання енергії під час польоту, що дозволяє БПЛА довше залишатися в повітрі або перевозити більші навантаження.

Конструкція повинна враховувати можливість кріплення або інтеграції вантажного відсіку. БПЛА повинен переносити невеликі об'єми або вантажі, вага яких може коливатися в межах від 5 кг до 50 кг (залежно від конкретних вимог). Вантажний відсік повинен легко адаптуватися для різних типів вантажів, таких як медикаменти, вода, продукти, інструменти для надання першої допомоги тощо. Важливо також передбачити захист вантажів від погодних умов (дощ, пил, сильний вітер), що дозволить безпечно доставляти необхідні ресурси в критичні зони.

Для забезпечення надійності конструкція повинна бути витривалою до механічних впливів, таких як пориви вітру, випадкові удари при посадці та

інші стресові навантаження. Особливу увагу слід приділити зміцненню кріплення крил, пропелерів, корпусу та вантажного відсіку. Конструкція БПЛА має бути герметичною в частинах, що містять електронні компоненти, щоб захистити їх від вологи, пилу та корозійних впливів. Розумний вибір матеріалів для захисту корпусу і можливість використання додаткових захисних покриттів забезпечать витривалість БПЛА під час роботи у важких погодних умовах. Використання матеріалів, що зберігають стабільність і функціональність у широкому температурному діапазоні. Це важливо для роботи в екстремальних умовах, коли БПЛА може використовуватися як у спекотних пустелях, так і в холодних гірських районах.

Форма корпусу дозволить знизити опір повітря, що підвищить ефективність польоту та зменшить витрати енергії. Зазвичай це досягається за допомогою обтічної форми корпусу, пропелерів з оптимізованою кількістю лопатей та їхньою відповідною формою. Аеродинамічні властивості мають забезпечувати стабільність польоту навіть при різких маневрах та зміні швидкості. Це допоможе БПЛА підтримувати стійкість навіть за сильних поривів вітру. Пропелери мають бути встановлені таким чином, щоб рівномірно розподіляти вагу, що покращить стабільність польоту. Розташування пропелерів у квадратній чи Х-подібній формації дозволяє збалансувати під час поворотів, прискорення та гальмування, що зменшить ризик аварій.

Потужна та довговічна акумуляторна система, здатна забезпечити тривалий політ навіть за повного навантаження. Акумулятори повинні мати достатню ємність для забезпечення віддалених операцій. Для продовження тривалості польоту, якщо БПЛА використовується в сонячних регіонах, можна додатково використовувати сонячні панелі, які живитимуть або підзаряджатимуть акумулятор під час польоту.

Надійна навігаційна система, що забезпечує точне розташування та орієнтацію в просторі, особливо в умовах поганої видимості або складного рельєфу. Інтеграція датчиків для уникнення зіткнень з іншими об'єктами,

такими як будівлі, дерева або інші БПЛА. Така система покращує безпеку польоту. На випадок надзвичайних ситуацій повинен мати систему, що автоматично зупинить рух пропелерів та приземлить пристрій у найбезпечнішому місці.

Модульність дозволяє легко ремонтувати або змінювати окремі компоненти БПЛА, такі як пропелери, акумулятори чи датчики. Це значно полегшує обслуговування та ремонт, особливо в умовах обмежених ресурсів. Елементи, що найбільш схильні до зносу, повинні легко зніматися та змінюватися без потреби в складних інструментах, що полегшує процес обслуговування на місці.

### 1.1.2 Комплектуючі БПЛА

Для самостійної збірки квадрокоптера давайте розглянемо основні комплектуючі. Незалежно від розмірів коптера, конструктивний принцип і базовий набір деталей для всіх БПЛА однаковий. Будь то компактний гоночний FPV-коптер чи великий професійний мультикоптер, основні кроки складання залишаються спільними. Призначення квадрокоптера – будь то FPV для відеоспостереження, БПЛА для аерофотозйомки важкої камери або транспортний коптер – визначає вимоги до комплектуючих, хоча базовий набір деталей однаковий. Вибір компонентів слід робити на основі характеристик, відповідно до призначення БПЛА. Під час проєктування важливо заздалегідь спланувати всі необхідні частини, ретельно підібрати їх, врахувати вагу, розмір, параметри силової установки (мотори, регулятори, акумулятори, контролери), групи пропелерів, щоб досягти потрібних характеристик квадрокоптера.

Рама квадрокоптера – це основа, на яку встановлюються всі частини та компоненти БПЛА, наче скелет чи каркас. Вона забезпечує міцність конструкції та захищає дорогі компоненти під час жорстких посадок чи падінь. Прикладом для неї може стати карбонова рама. Вона є легкою та міцною.

Мотори для квадрокоптера – це безщіткові електродвигуни циліндричної форми, які обертають пропелери, створюючи підйомну силу для польоту. Від швидкості обертання пропелерів залежить швидкість і маневреність БПЛА. Тип двигунів обирається в залежності від призначення квадрокоптера: для вантажопідйомності, швидкісних перегонів або стабільної зйомки.

Пропелери – це елементи, які дозволяють моторам створювати підйомну силу. Вибір пропелерів слід проводити після підбору моторів, з урахуванням розмірів рами.

Регулятор швидкості (ESC) – це контролер, який керує обертами двигунів залежно від команд польотного контролера. Він подає струм на обмотки моторів, забезпечуючи їх правильну роботу.

UBEC (універсальний блок стабілізації напруги) перетворює напругу від акумулятора на 5 В для живлення електроніки, забезпечуючи стабільну потужність струму до 10 А.

Польотний контролер – це мікропроцесорний пристрій, що обробляє дані з датчиків і керує БПЛА. Він може отримувати команди від пульта або виконувати автопілотні функції, такі як утримання висоти, повернення додому, чи політ за заданим маршрутом.

Телеметрія – це система збору даних про стан БПЛА, яка дозволяє оператору відслідковувати швидкість, висоту, координати, рівень заряду акумулятора та інші параметри в режимі реального часу.

OSD (On-Screen Display) – плата, що виводить важливі дані польоту на екран, допомагаючи оператору контролювати параметри БПЛА під час польоту.

### 1.1.3 Вибір матеріалів

Для виробництва БПЛА використовують матеріали, що поєднують легкість, міцність, довговічність і стійкість до кліматичних умов, щоб забезпечити його надійну роботу в різних умовах експлуатації. Корпус БПЛА

часто виготовляють із вуглепластику, склопластику або алюмінієвих сплавів, адже ці матеріали мають відмінні механічні властивості. Зокрема, вуглепластик поєднує високу міцність із низькою вагою, що важливо для зниження загальної маси і, як наслідок, зменшення енергоспоживання. Алюмінієві сплави забезпечують стійкість до механічних впливів і вібрації, тому використовуються в частинах конструкції, де важливі як міцність, так і легкість.

Пропелери БПЛА виготовляють з матеріалів, що зберігають жорсткість і не деформуються при високій швидкості обертання, таких як карбон або армовані композити. Карбонові пропелери є популярним вибором завдяки своїй надійності та стійкості до деформацій, що забезпечує стабільний політ. Кріплення і амортизаційні елементи також відіграють важливу роль: застосування силіконових або гумових прокладок допомагає зменшити вібрації, тим самим захищаючи електронні компоненти БПЛА від зайвих навантажень і пошкоджень під час роботи.

Для захисту від впливу зовнішнього середовища корпус БПЛА герметизують спеціальними полімерними покриттями або захисними плівками, які запобігають потраплянню вологи, пилу та захищають від корозії. Така додаткова обробка дозволяє продовжити термін служби БПЛА і забезпечити його працездатність навіть за несприятливих погодних умов.

#### 1.1.4 Економічна та екологічна обґрунтованість

Економічна обґрунтованість використання БПЛА у гуманітарних місіях включає в себе численні переваги, які допомагають зменшити витрати та підвищити ефективність доставки допомоги. Одним з ключових аспектів економічної вигоди є зниження витрат на транспортування. Зазвичай для доставки використовується автомобільний, водний або авіаційний транспорт, що вимагає значних витрат на паливо, обслуговування та інфраструктуру. БПЛА, зокрема електричні, потребують значно менше ресурсів для перевезення, а їхня автономність дозволяє здійснювати польоти без

необхідності участі пілота чи великого екіпажу, що також знижує операційні витрати.

Крім того, використання БПЛА скорочує час доставки, що є критично важливим у гуманітарних умовах, особливо під час надзвичайних ситуацій. Звичайні транспортні засоби часто стикаються з проблемами через руйнування інфраструктури в зонах конфліктів або стихійних лих, тоді як БПЛА можуть оминати ці перешкоди та доставити допомогу безпосередньо до точки призначення. Це не лише підвищує ефективність гуманітарних операцій, а й допомагає уникнути додаткових витрат, пов'язаних із затримками, які можуть призвести до подорожчання доставок, втрати чи псування вантажу.

З економічної точки зору БПЛА також зменшують потребу в зберіганні великих запасів у проміжних пунктах, оскільки допомога може доставлятися безпосередньо у потрібні місця у режимі точно вчасно. Це мінімізує витрати на створення та підтримку складів, логістичних центрів та транспортних коридорів, особливо у віддалених чи важкодоступних місцевостях. Підтримка таких складських приміщень зазвичай потребує додаткових ресурсів, таких як персонал, охорона, холодильне обладнання (для медичних товарів), а також постійний контроль і облік запасів. БПЛА ж дозволяють транспортувати товари безпосередньо, тим самим значно зменшуючи накладні витрати на логістику та облік.

Ще однією важливою складовою економічної ефективності є оптимізація витрат на персонал. Управління БПЛА, особливо автономними або напіваавтономними, потребує меншої кількості операторів у порівнянні з традиційним транспортом, що скорочує витрати на оплату праці та додатковий обслуговуючий персонал. Наприклад, для традиційного конвою потрібні водії, охоронці та технічний персонал, тоді як для керування групою БПЛА може знадобитися лише кілька операторів та технічних фахівців для налаштування та обслуговування обладнання. У результаті знижується не тільки кількість

робочих місць, необхідних для підтримки операцій, але й загальні витрати на соціальні пакети, страхування та забезпечення безпеки робітників.

## 1.2 Класифікація БПЛА

БПЛА, або безпілотні літальні апарати, класифікуються за кількома критеріями, серед яких найважливіші – призначення та технологічні можливості (рисунок 1.1) [4].

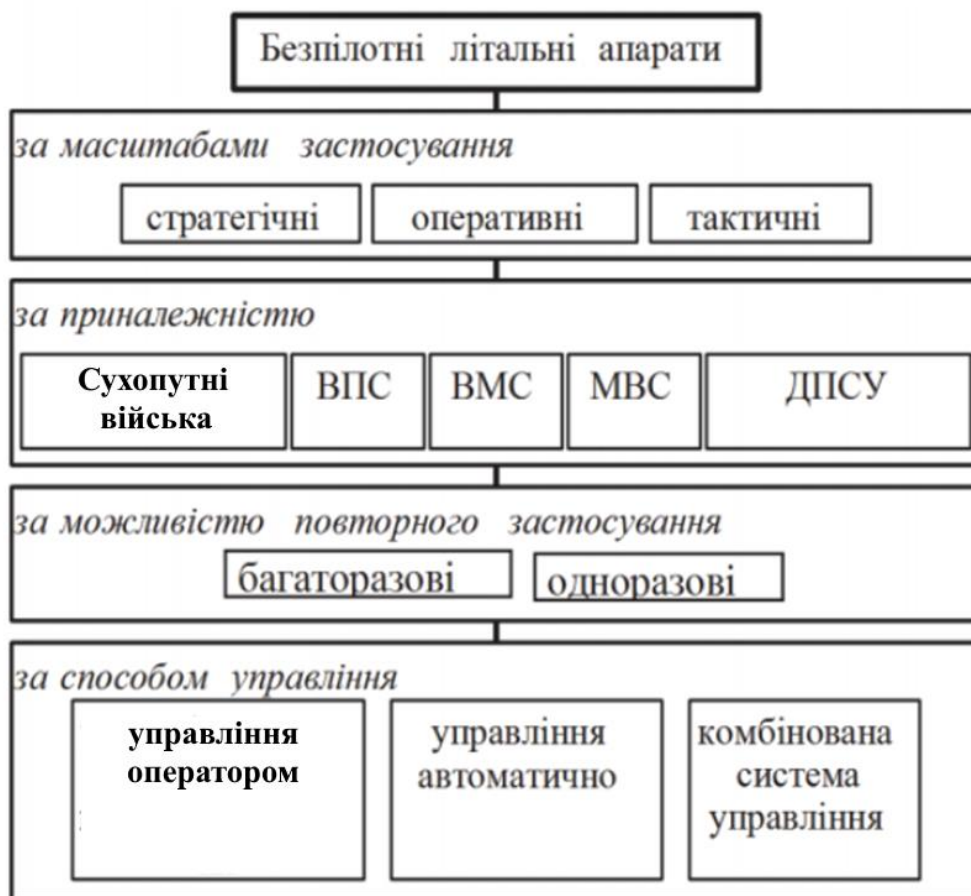


Рисунок 1.1 – Класифікація БПЛА за організаційними ознаками [4]

Таблиця 1.1 – Класифікація БПЛА за технічними ознаками

Ознака	Види
за типом	<p>Квадрокоптери – мають чотири ротори, часто використовуються для аерозйомки та розваг.</p> <p>Мультикоптери – мають більше чотирьох ротора (пентакоптери, гексакоптери тощо).</p> <p>Літаючі крилові апарати – має форму літака, підходить для дальніх перельотів.</p> <p>Вертикально злітаючі апарати (VTOL) – можуть злітати і приземлятися вертикально.</p>
за радіусом дії	<p>Короткого радіусу дії: Зазвичай до 5 км.</p> <p>Середнього радіусу дії: Від 5 до 50 км.</p> <p>Далекого радіусу дії: Понад 50 км.</p>
за масою	<p>Легкі БПЛА до 5 кг.</p> <p>Середні БПЛА від 5 до 150 кг.</p> <p>Важкі БПЛА понад 150 кг</p>
за тривалістю польоту	<p>Короткочасні до 30 хвилин.</p> <p>Середньочасні від 30 хвилин до 2 годин.</p> <p>Довгочасні понад 2 години.</p>
за масштабом завдань, що вирішуються	<p>Комерційні – для доставки, аерозйомки, моніторингу.</p> <p>Військові – розвідка, спостереження, ударні операції.</p> <p>Наукові – дослідження навколишнього середовища, геологічні дослідження.</p>
за використанням	<p>Громадянські: Використовуються в комерційних та наукових цілях.</p> <p>Військові: Використовуються для виконання завдань в армії.</p>
за базуванням	<p>Наземні БПЛА, які запускаються з землі.</p> <p>Морські БПЛА, які запускаються з кораблів або платформ на воді.</p> <p>Авіаційні БПЛА, які запускаються з інших літальних апаратів</p>
за правилами польоту	<p>Автономні, які можуть виконувати місії без втручання оператора.</p> <p>Ручні, які контролюються оператором в реальному часі.</p> <p>Напіваавтономні – комбінація автономного та ручного управління.</p>
за типом крила	<p>Суцільнокрилі, які мають єдине крило.</p> <p>Дельтоподібні, які мають форму дельти.</p> <p>Стандартні – традиційна форма літака з фюзеляжем.</p>
за типом паливного бака	<p>Електричні, які використовують акумулятори.</p> <p>Двигуни внутрішнього згоряння, які використовують паливо (бензин, дизель).</p> <p>Гібридні – вони поєднують електрику та двигуни внутрішнього згоряння.</p>
за паливною системою	<p>Електричні – з електродвигунами.</p> <p>Теплові – з двигунами внутрішнього згоряння.</p> <p>Гібридні – поєднують обидва типи.</p>
за кількістю використань	<p>Одноразові</p> <p>Багаторазові, які можуть використовуватися багаторазово після перезарядки або технічного обслуговування.</p>

За призначенням БПЛА поділяються на кілька основних категорій, які охоплюють широкий спектр застосувань (рисунок 2.2) [4].



Рисунок 1.2 – Спектр застосувань основних категорій БПЛА [4]

### 1.2.1 Види БПЛА за призначенням

Одним із найпоширеніших типів є військові БПЛА, що використовуються для розвідки, спостереження та виконання бойових завдань. Військові БПЛА можуть бути оснащені камерами, радарми, лазерними системами наведення, ракетами або іншими видами озброєння, залежно від їх призначення. Основна їх мета – зменшення ризику для життя військових, виконання складних або небезпечних операцій, як-от атаки на важкодоступні цілі або спостереження за ворожими позиціями. Прикладами є ударні БПЛА, такі як MQ-9 Reaper, або БПЛА для тактичної розвідки, як Raven.

БПЛА цивільного призначення охоплюють широкий спектр застосувань, починаючи з аерофотозйомки, сільського господарства і

закінчуючи комерційною доставкою та екологічним моніторингом. Для фотозйомки та відеозйомки використовуються БПЛА, оснащені високоякісними камерами, що дозволяють здійснювати аерозйомку місцевості, спортивних подій, нерухомості, кіно та інших заходів.

У сільському господарстві БПЛА застосовуються для спостереження за станом посівів, внесення добрив і пестицидів, моніторингу вологості ґрунту, що дозволяє підвищити ефективність роботи фермерів. Прикладом стане компанія Delair (рисунок 1.3) [6]. Вона створює БПЛА для тривимірного картографування та сільськогосподарських досліджень. Їх використовують для аналізу стану ґрунтів і врожаїв, що важливо для агрономічних досліджень.



Рисунок 1.3 – БПЛА компанії Delair [6]

У галузі доставки товарів, такі як продукти споживання (продукти харчування, медичні препарати), можуть бути доставлені за допомогою БПЛА, особливо у важкодоступні місця, де інші транспортні засоби не можуть швидко дістатися. Прикладом компанії, яка активно розробляє технології БПЛА для доставки, є Amazon та компанія Zipline у Руандії. Вони, з використанням своїх БАС, займаються постачанням препаратів крові до лікарень, які знаходяться у важкодоступних та найвіддаленіших районах країни. Компанії Zipline вдалося зменшити час доставки до 20 хвилин, що дозволило скоротити кількість зіпсованих вантажів на 95 % (рисунок 1.4) [7].



Рисунок 1.4 – Поставка медичних препаратів через застосування БПЛА компанією Zipline [7]

Існують БПЛА для наукових досліджень. Вони застосовуються у різних галузях, таких як геологія, метеорологія, екологія, археологія, і мають можливість збору даних у важкодоступних регіонах – наприклад, на вулканах, льодовиках або в океані. Такі БПЛА можуть бути оснащені сенсорами для вимірювання температури, вологості, тиску, концентрації газів і інших фізичних параметрів, що дозволяє дослідникам вивчати кліматичні зміни, слідкувати за станом льодовиків або досліджувати екосистеми. Прикладом може послугувати Швейцарська компанія SenseFly, яка була заснована в 2009 році і є дочірньою компанією Parrot Group (рисунок 1.5) [8]. Компанія спеціалізується на виробництві безпілотних літальних апаратів (БПЛА), таких як eBee Plus, eBee SQ, eBee та eBee RTK, займаючи сильні позиції як у комерційному, так і в промисловому сегментах використання БПЛА. Невеликі надлегкі БПЛА SenseFly дозволяють виконувати аерофотозйомку на висотах від 100 м до 1000 м, створюючи зображення з роздільною здатністю від 3 см/ піксель до 30 см/піксель. За одну польотну місію вони можуть картографувати територію площею від 1,5 км<sup>2</sup> до 10 км<sup>2</sup>, залежно від обраної роздільної здатності знімків і висоти польоту.



Рисунок 1.5 – БПЛА senseFly eBee X [8]

Також виділяють БПЛА для рятувальних операцій. Вони часто використовуються для пошуково-рятувальних місій у горах, на воді, або після стихійних лих, таких як землетруси чи повені. Такі БПЛА можуть бути оснащені тепловізорами, що дозволяє знаходити людей у важкодоступних або темних місцях, а також засобами для перевезення невеликих вантажів, таких як медикаменти чи їжа. Прикладом є DJI, яка розробляє БПЛА з тепловізорами та камерами високої роздільної здатності для пошуково-рятувальних операцій (рисунок 1.6) [9]. Моделі, як-от DJI Mavic 2 Enterprise Dual, мають широкий спектр застосувань у надзвичайних ситуаціях. Згідно з останньою статистикою DJI, світового лідера в області розробки цивільних БПЛА і технологій аерофотозйомки, більше 500 людей по всьому світу було врятовано за допомогою БПЛА. В середині жовтня помічники шерифа поліції штату Міссурі (США) використовували БПЛА DJI з тепловізором, щоб знайти зниклу жінку 93 років в поле в темний час доби.



Рисунок 1.6 – БПЛА DJI Mavic 2 Enterprise Dual [9]

### 1.2.2 Технічні можливості БПЛА

Щодо технологічних можливостей, БПЛА класифікуються за кількома важливими параметрами. Один з них – розмір і вага. Від легких міні- БПЛА до великих стратегічних БПЛА, різні БПЛА мають різні рівні автономності та можливості підняття вантажів. Наприклад, міні- БПЛА зазвичай мають вагу до кількох кілограмів і обмежений радіус дії, але вони надзвичайно маневрені та здатні до польотів у важкодоступних місцях. Натомість великі БПЛА, такі як стратегічні військові БПЛА, мають можливість тривалого польоту, великої вантажопідйомності та можуть нести значне навантаження у вигляді озброєння або складного обладнання.

Інший важливий критерій – це тип двигуна та джерело живлення. Більшість сучасних БПЛА використовують електричні двигуни, що дозволяє їм бути екологічно чистими, тихими та відносно простими в обслуговуванні. Однак, для важких вантажів або довготривалих місій можуть використовуватися з реактивними двигунами або двигунами внутрішнього згоряння, що забезпечують вищу потужність і дальність польоту.

Автономність і системи управління також є важливим аспектом класифікації. БПЛА можуть бути повністю керованими операторами у режимі реального часу або мати високий рівень автономності, здатні виконувати

завдання самостійно за допомогою встановлених програм. БПЛА з автономними системами здатні виконувати складні маневри, ухилятися від перешкод і досягати своїх цілей, використовуючи алгоритми штучного інтелекту та комп'ютерного зору. Зокрема, такі можуть самостійно здійснювати посадку, зліт і маршрутне планування на основі зібраних даних або заданих оператором параметрів.

БПЛА також класифікуються за дальністю польоту та висотою, на якій вони можуть працювати. Наприклад, високовисотні БПЛА здатні літати на десятки кілометрів над поверхнею землі для виконання стратегічних завдань, таких як моніторинг або передача даних на великі відстані. Середньовисотні та низьковисотні БПЛА використовуються для ближчої роботи, як-от спостереження за місцевістю або виконання тактичних завдань.

### 1.3 Технічні вимоги до БПЛА для гуманітарних місій

БПЛА, призначені для гуманітарних місій, мають задовольняти низку суворих технічних вимог, які забезпечують їх ефективність у складних та непередбачуваних умовах. Основними аспектами, які відіграють роль у визначенні їх придатності для виконання таких завдань, є мобільність, автономність, вантажопідйомність та стійкість до погодних умов.

Мобільність є ключовим фактором для БПЛА у гуманітарних місіях. Їм необхідно оперувати у складних і різноманітних ландшафтах, чи то густі ліси, гірські райони чи міські зони, що постраждали від катастроф. Можливість вертикального зльоту та посадки (VTOL) значно збільшує їхню мобільність, оскільки дозволяє їм не залежати від довгих злітно-посадкових смуг або спеціальної інфраструктури. Маневреність БПЛА важлива для точної доставки вантажів у важкодоступні райони, а також для швидкого реагування на зміни на землі.

Автономність БПЛА також відіграє критичну роль у гуманітарних місіях, особливо коли йдеться про тривалі операції у віддалених районах без

доступу до інфраструктури для заряджання або управління. Сучасні БПЛА мають бути обладнані системами штучного інтелекту та машинного зору, що дозволяють їм самостійно орієнтуватися у просторі, уникати перешкод і адаптуватися до умов на маршруті, що змінюються. Здатність до автономного польоту також знижує необхідність постійного людського контролю, що звільняє операторів до виконання інших завдань.

Вантажопідйомність БПЛА безпосередньо визначає його корисність у гуманітарних місіях. Здатність перевозити медичні препарати, їжу, воду, обладнання або навіть рятувальні пристрої є ключовою вимогою для успішного виконання місій. При цьому важливо враховувати не тільки вагу вантажу, але його обсяг. Для таких місій можуть використовуватися БПЛА різної вантажопідйомності – від легких, що доставляють невеликі вантажі на короткі відстані, до важких моделей, здатних перевозити великі обсяги гуманітарної допомоги на далекі дистанції. Важливим фактором є також можливість адаптації вантажу під різні умови місії, чи то доставка ліків, крові чи життєво важливого обладнання.

Стійкість до погодних умов – ще один важливий критерій для БПЛА, які виконують гуманітарні місії. Часто такі місії проводяться в екстремальних умовах, таких як повені, урагани чи у зонах землетрусів. БПЛА має бути здатним витримувати сильний вітер, дощ, пил, високі та низькі температури, щоб гарантувати виконання завдання. Міцні та легкі матеріали, такі як вуглецеве волокно або композити, дозволяють конструкціям БПЛА бути одночасно легкими та міцними, а герметичні компоненти захищають їх від вологи та пилу. Також важливі системи антизледеніння та технології, які мінімізують вплив турбулентності та інших природних явищ.

Технологічна інтеграція також відіграє важливу роль. Наприклад, наявність високоточних GPS-систем і можливостей супутникового зв'язку дозволяє БПЛА точно планувати маршрути та передавати дані навіть за умов відсутності мобільної мережі. Камери високої чіткості, тепловізори та інші

рецептори дозволяють не тільки виконувати розвідку, а й знаходити постраждалих або визначати оптимальні зони для доставки вантажів.

#### 1.4 Потенційне гуманітарне та медичне використання БПЛА

Ключовим фактором, який визначає ефективність пошуково-рятувальних операцій, є можливість швидкого візуального аналізу ситуації з висоти (рисунок 1.7) [8]. Існує безліч випадків, коли жертви стихійного лиха виявляються в умовах, вкрай несприятливих і суворих. Ці обставини власними силами роблять рятувальні операції трудомісткими і висувають високі вимоги як до рятувальників, і до їх технологічного устаткування. Крім пошуку жертв стихійного лиха або аварій, БПЛА можуть використовуватися для доставки легких вантажів ізольованим постраждалим у віддалених або важкодоступних районах. За допомогою технології GPS (глобальної системи позиціонування) точне розташування ідентифікованого об'єкта може бути миттєво передано до штабу рятувальної операції.



Рисунок 1.7 – Сканування промислової зони західних Афін після смертоносної повені Мандри у 2017 році [8]

#### 1.4.1 Дрібномасштабне аварійне картування

Візуальні дані, зібрані за допомогою БПЛА, можуть забезпечити більш високі стандарти безпеки для робочих команд. Землетрус на Гаїті в 2010 році став відправною точкою для цього підходу, а землетрус у Непалі через п'ять років продемонстрував зразок «найкращої практики». Об'єднавши зусилля виробників БПЛА і смартфонів, фахівців із картографічного програмного забезпечення та студентів Університету Катманду, вони залучили БПЛА для допомоги в одній із найбільш постраждалих спільнот. Роздрукувавши масштабні аерофотознімки, співробітники звернулися до мешканців села за допомогою. Їх попросили поділитися важливими місцевими знаннями про регіон для виявлення безпечних джерел питної води, небезпечного сміття, переміщених осіб, зруйнованих будівель та транспортних мереж.

#### 1.4.2 Пошук постраждалих під завалами

Після того, як людина опиняється під уламками після землетрусу, ймовірність її виживання вважається меншою з кожним днем. Було запропоновано безліч різних методів та протестовано різноманітне обладнання. Один із інноваційних підходів використовує низку датчиків, які легко встановлюються на БПЛА. Ця система, розроблена дослідниками НАСА, називається «Радар-детектор NASA для пошуку людей для реагування на стихійні лиха та надзвичайні ситуації» (FINDER). По суті, це робот із високочутливими датчиками, які можуть визначати частоту серцевих скорочень та дихання живої істоти під завалами. Через глибоку соціально-економічну нерівність у світі легко помітити, що найменш забезпечені регіони страждають від таких катастроф більшою мірою та серйозніше. Як зазначає доктор Марі-Поль Кіні, помічник директора із загальних систем охорони здоров'я та інновацій Всесвітньої організації охорони здоров'я, у всьому світі кількість людей з доступом до покращених санітарних умов менша, ніж кількість власників мобільних телефонів. В іншій запропонованій системі БПЛА з особливими антенами та чутливими приймачами сканує уламки у

пошуках сигналів мобільних телефонів і, виявивши їх, фіксує їхнє розташування на цифрових картах.

1.4.3 Логістика та екстрена доставка медичного приладдя та обладнання Використання БПЛА для доставки ліків (дефібриляторів, препаратів крові тощо) може бути вирішальним як для виживання, так і для покращення умов повсякденного життя. Діабет – одне із захворювань, що потребують негайного втручання. Замість того, щоб втрачати дорогоцінний час в очікуванні машини швидкої допомоги або під час транспортування містом, служба доставки БПЛА могла б відправити ін'єкцію глюкози безпосередньо до місця перебування пацієнта протягом декількох хвилин. Інший, схожий сценарій можна представити в сільській частині країни, що розвивається, в Африці на південь від Сахари. Величезна кількість людей у країнах, що розвиваються, залишаються в пастці під час сезонів сильних дощів. Через суворі погодні умови дороги залишаються непрохідними протягом декількох днів або навіть місяців, і люди відрізані від ліків. Схожий випадок – Папуа-Нова Гвінея в Тихому океані, де зафіксовані одні з найвищих у світі показників захворюваності на туберкульоз. Існують БПЛА, які успішно використовувалися для доставки мікробіологічних зразків, вакцин та ліків у сільські та віддалені райони.

#### 1.4.4 Гуманітарні безпілотники над зонами конфліктів

Кореляція використання БПЛА з військовими діями піднімає безліч моральних проблем. Враховуючи суперечки, які оточують БПЛА, а також моральні дилеми, які вони піднімають, значна кількість гуманітарних організацій та міжнародних НУО, можливо, виключають їх із місій у зонах воєнних дій та конфліктних районах. У 2014 році Управління ООН з координації гуманітарних питань опублікувало періодичний політичний документ під назвою «Безпілотні літальні апарати у гуманітарному реагуванні». У цьому звіті чітко зазначено, що «використання БПЛА в умовах

конфлікту все ще надто складне і його важко відокремити від військового використання». Грубе резюме проблем, пов'язаних з використанням БПЛА у зонах конфліктів, можна сформулювати наступним чином: цивільним особам, які проживають у зонах конфліктів, дуже важко, якщо не неможливо, відрізнити військовий безпілотник від гуманітарних, потенційно доставляючих ліків до найближчої лікарні, і під час війни, безпілотник що літає, в першу чергу використовується у військових цілях і в основному зі смертельними або агресивними намірами.

1.5 Огляд і вибір програмного забезпечення для створення цифрової моделі БПЛА для гуманітарної допомоги

#### 1.5.1 Програмне забезпечення SolidWorks Software

SolidWorks – програмний продукт компанії SolidWorks Corporation (зараз – дочірня компанія Dassault Systèmes), САПР, інженерного аналізу та підготовки виробництва будь-якої складності та призначення.

Програма є ядром інтегрованого комплексу автоматизації підприємства, за допомогою якого здійснюється підтримка життєвого циклу виробу відповідно до концепції CALS – технологій, включаючи двонаправлений обмін даними з іншими Windows-застосунками та створення інтерактивної документації. Вона є потужним ПЗ для 3D-моделювання, що спеціалізується на машинобудівному і промисловому дизайні. Його основна перевага – зручний інтерфейс та інтуїтивний робочий процес, що дозволяє інженерам швидко створювати і редагувати деталі та зібрання будь-якої складності. SolidWorks забезпечує параметричне моделювання, дозволяючи змінювати розміри та властивості елементів у реальному часі, що корисно для оптимізації проєктів під різні вимоги.

Окрім цього, ПЗ пропонує інструменти для симуляції фізичних навантажень і аналізу, включаючи модулі для аналізу деформацій, теплових режимів, вібрацій і динаміки рідин. Це допомагає інженерам перевіряти

міцність та надійність моделей без необхідності створювати фізичні прототипи. SolidWorks також інтегрується з САМ-інструментами, що дозволяє легко створювати траєкторії для виробництва на верстатах з числовим програмним управлінням (ЧПУ), включаючи токарні та фрезерні операції.

SolidWorks – є не поганим вибором для моделювання БПЛА, оскільки забезпечує точні інструменти для 3D-моделювання, симуляції та оптимізації механічних систем. У SolidWorks можна створювати деталі БПЛА з високою деталізацією, починаючи від рами і пропелерів до кріплень для батарей та електроніки, з можливістю адаптувати дизайн під специфічні аеродинамічні вимоги. Програма дозволяє інженерам створювати параметричні моделі, в яких можна легко змінювати розміри, форму та матеріали елементів, що полегшує роботу над прототипами БПЛА різних розмірів і типів (рисунок 1.8) [9].

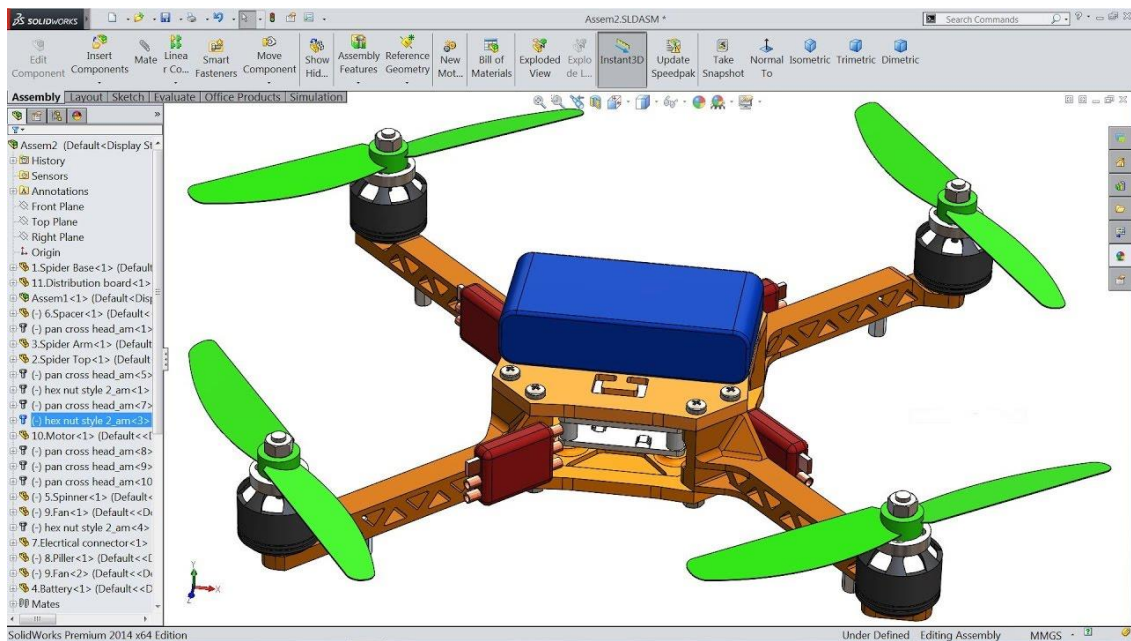


Рисунок 1.8 – 3D-модель БПЛА, розробленого у ПЗ SolidWorks [9]

ПЗ включає потужні інструменти для симуляції, які допомагають протестувати конструкцію під різними умовами навантаження, перевіряючи, наприклад, міцність рами БПЛА під час зльоту чи посадки або аеродинамічні характеристики під час польоту. Також можна використовувати модуль Flow

Simulation для аналізу повітряного потоку навколо БПЛА, що важливо для оптимізації продуктивності та економії енергії. Інструменти для оптимізації дизайну дозволяють налаштувати вагу конструкції БПЛА, зберігаючи його міцність і надійність, що особливо важливо для розширення тривалості польоту.

SolidWorks інтегрується з САМ-модулями, які дозволяють швидко підготувати деталі до виробництва, створюючи траєкторії для ЧПУ-фрезерування або 3D-друку. Це забезпечує ефективний перехід від цифрового моделювання до створення фізичного прототипу, дозволяючи виготовити різні компоненти БПЛА швидко та з високою точністю. Завдяки підтримці командної роботи, SolidWorks також дає змогу інженерам спільно розробляти та вдосконалювати дизайн БПЛА, працюючи над проектами з будь-якої точки світу і обмінюючись ідеями та результатами в режимі реального часу.

### 1.5.2 Програмне забезпечення Blender Software

Blender – це програмний пакет для створення тривимірної комп'ютерної графіки, що включає засоби моделювання, анімації, рендерингу, після-обробки відео. Особливостями пакету є малий розмір, висока швидкість рендерингу, наявність версій для багатьох операційних систем – FreeBSD, GNU/Linux, Mac OS X, SGI Irix 6.5, Sun Solaris 2.8 (sparc), Microsoft Windows, SkyOS, MorphOS та Pocket PC. Пакет має такі функції, як симуляція динаміки твердих тіл (Rigid Body), рідин (Liquid simulation) та м'яких тіл (Soft body), редагування матеріалів і геометрії за принципом вузлів (Nodes), велику кількість розширень, написаних мовою Python.

ПЗ є безкоштовним і відкритим для 3D-моделювання, яке підходить для створення концептуальних моделей і візуалізацій БПЛА. Завдяки широкому інструментарію для полігонального та поверхневого моделювання, Blender дозволяє швидко створювати деталі БПЛА, такі як корпус, пропелери, кріплення, раму та інші компоненти. Програма підтримує параметричне

моделювання, що дозволяє точно контролювати форму та розміри деталей, роблячи її зручною для розробки різних варіантів дизайну (рисунок 1.9) [10].

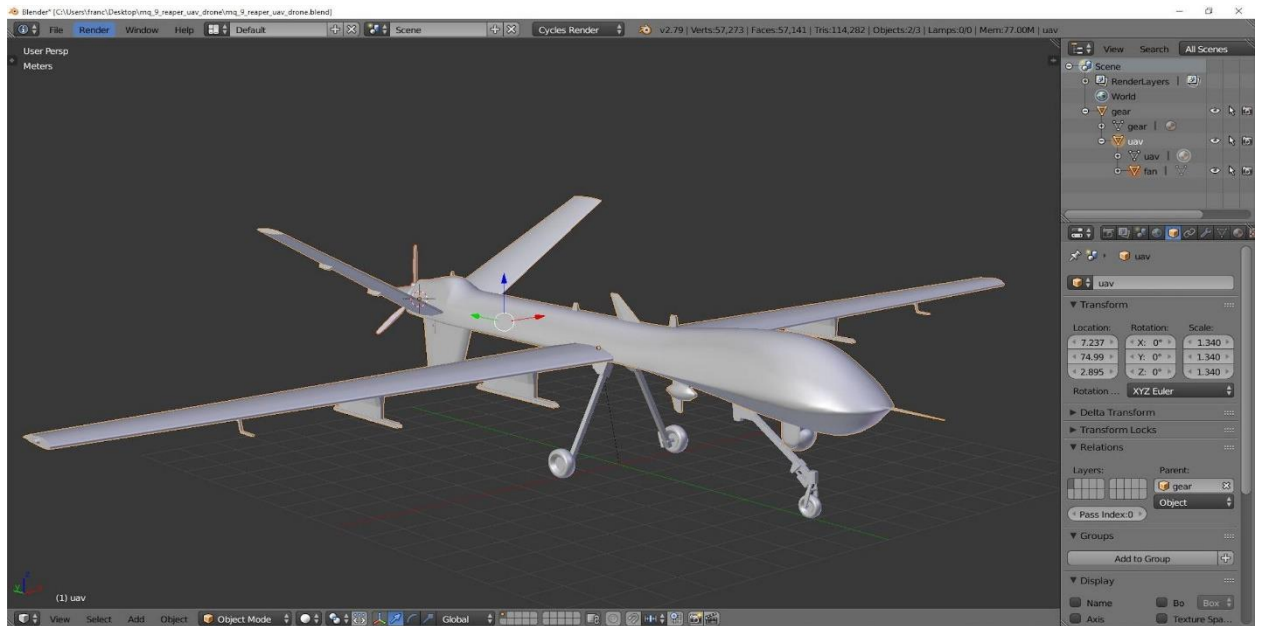


Рисунок 1.9 – 3D-модель БПЛА, розробленою у ПЗ Blender [10].

ПЗ також включає потужні інструменти для рендерингу і текстурування, що дозволяє створювати фотореалістичні зображення БПЛА, які підходять для презентацій або маркетингових матеріалів. Це робить Blender особливо корисним для демонстрації концептів та інтер'єрних чи екстер'єрних варіантів. Крім того, програмне забезпечення містить базові інструменти для симуляції фізики, такі як анімація руху та симуляція зіткнень, що може допомогти перевірити, як БПЛА поводитиметься у простих умовах польоту або посадки.

Програмне забезпечення Blender також підтримує інтеграцію з іншими САД-програмами, що дозволяє експортувати модель БПЛА для подальшої обробки чи симуляцій у більш технічних програмах, таких як Fusion 360 чи SolidWorks. Це дає змогу використовувати Blender як початковий етап для творчого проектування, а потім переходити до інженерного доопрацювання. З огляду на велику кількість плагінів та додатків, Blender легко адаптується під

конкретні вимоги проєкту, і користувачі можуть додавати потрібні інструменти для удосконалення роботи з моделями БПЛА.

### 1.5.3 Програмне забезпечення CATIA Software

CATIA (Computer Aided Three Dimensional Interactive Application) – система автоматизованого проєктування (САПР) французької фірми Dassault Systèmes. Програму адаптували для аерокосмічної, автомобільної, суднобудівної та інших галузей. Її використовував архітектор Френк Гарі для проєктування музею Гугенхайма в Більбао і Уолт Дісней Концерт Холл у Лос-Анжелесі.

V4 була анонсована в 1993 р. й створювалася для Unix подібних операційних систем, CATIA V5 була анонсована в 1998 році, і це перша з версій, що може працювати під керуванням Microsoft Windows. По закінченню Dassault Systems, CATIA V5 була написана з нуля і втілила в собі передові технології САПР. Спочатку CATIA V5 не була особливо популярною на ринку і, щоб стимулювати її використання, Dassault Systems висунула концепцію PLM (Product Lifecycle Management). Ідея PLM виявилася вдалою і її почала використовувати вся індустрія САПР.

Dassault Systems анонсувала нову версію системи – CATIA V6. V6 підтримує програми моделювання для всіх інженерних дисциплін і колективні бізнес-процеси протягом життєвого циклу виробу. Нова концепція фірми одержала назву «PLM 2.0 на платформі V6». Суть концепції – тривимірне моделювання і колективна робота в реальному часі. Для зв'язку між людьми, що перебувають у різних точках світу, передбачені засоби простого підключення до Web. Кожний користувач може придумувати, розробляти продукти та обмінюватися інформацією на універсальній 3D-мові.

CATIA – це ПЗ для інженерного моделювання, яке широко використовується в аерокосмічній, автомобільній та інших високотехнологічних галузях, що робить його не поганим для проєктування БПЛА. CATIA дозволяє створювати детальні 3D-моделі із точною

опрацюванням усіх елементів конструкції, від аеродинамічного корпусу до внутрішніх механічних компонентів. Завдяки параметричному моделюванню вона може легко змінювати конфігурацію БПЛА, випробовуючи різні варіанти дизайну та матеріалів, щоб досягти оптимальної ваги та міцності (рисунок 1.10) [11].

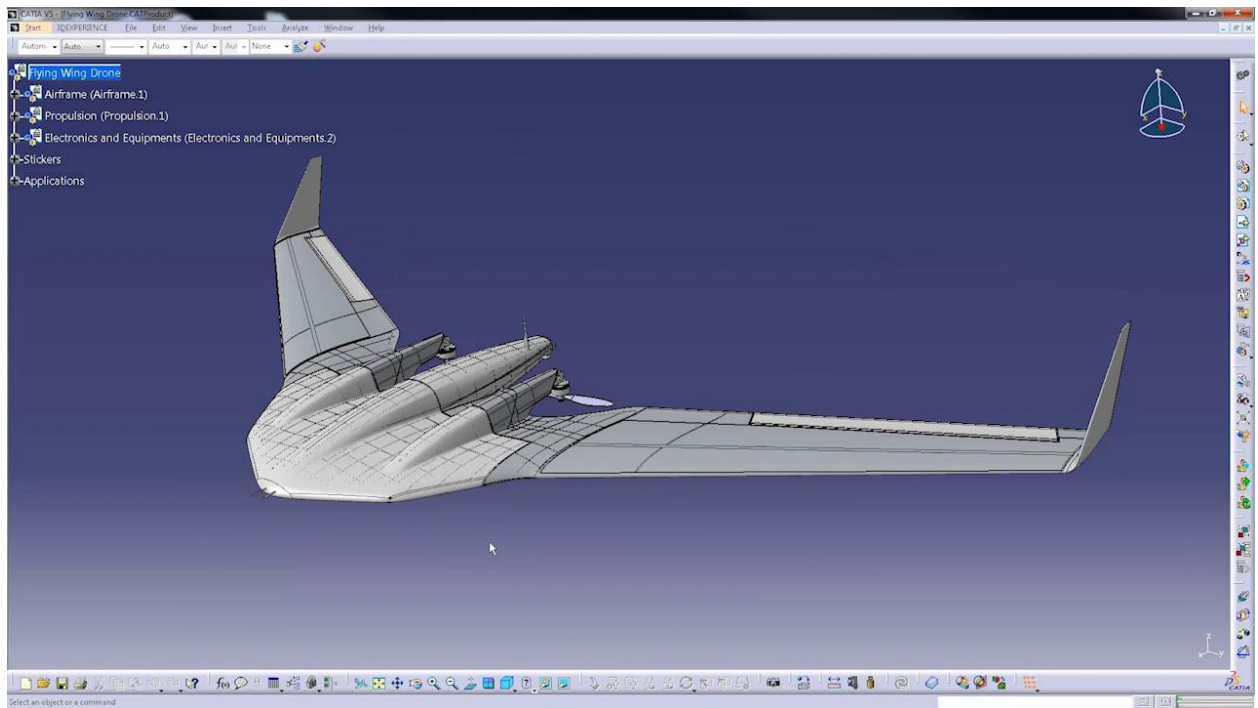


Рисунок 1.10 – 3D-модель БПЛА, розробленого у ПЗ САТІА [11]

Інструменти для симуляції дозволяють інженерам виконувати аналіз аеродинамічних характеристик, моделювати повітряний потік, перевіряти стійкість конструкції під навантаженням і проводити теплові симуляції, що особливо важливо для БПЛА, які працюють у складних погодних умовах. Програма підтримує моделювання поведінки електронних компонентів та систем керування, що дозволяє створювати повноцінну віртуальну модель БПЛА з урахуванням роботи бортових систем.

У це ПЗ також інтегрується з PLM (Product Lifecycle Management) системами, що забезпечує повний контроль над життєвим циклом проєкту БПЛА – від концепції до виробництва та технічного обслуговування. Це особливо корисно для командної роботи, оскільки інженери, дизайнери та

виробничі групи можуть одночасно працювати над проектом, маючи доступ до актуальних даних і версій моделі.

### 1.6 Autodesk Fusion 360 Software як програмне забезпечення для побудови 3D-моделі БПЛА для гуманітарної допомоги

Autodesk Fusion 360 Software – це комерційне програмне забезпечення для автоматизованого проектування (САПР), автоматизованого виробництва (САР), автоматизованого проектування (САР) та проектування друкованих плат (PCB), розроблене компанією Autodesk. Воно доступне для Windows, macOS та веб-браузерів, зі спрощеними програмами для Android та iOS. Fusion ліцензується як платна підписка з безкоштовною обмеженою домашньою некомерційною персональною версією. Також це платформа для 3D-дизайну, моделювання, симуляції та виробництва. Вона надає можливості для створення як простих, так і складних механічних деталей і зборок. Завдяки об'єднанню параметричного, поверхневого та прямого моделювання, Fusion 360 дозволяє дизайнерам швидко вносити зміни до моделі та створювати високоточні проекти.

Програма також містить розширені функції симуляції, які дають змогу аналізувати механічні навантаження, деформації та інші фізичні властивості. Це дозволяє інженерам оптимізувати моделі, роблячи їх міцнішими та ефективнішими ще до виготовлення. Інструменти для комп'ютерної обробки (САР) забезпечують легкий перехід від моделі до виробництва: траєкторії для фрезерування, лазерного різання або 3D-друку створюються всередині програми.

Fusion 360 підходить для моделювання БПЛА завдяки своїй універсальності та потужним інструментам для дизайну, симуляції та інженерного аналізу. Програма дозволяє створювати деталізовані 3D-моделі, що включають корпус БПЛА, його пропелери, раму, кріплення для батарей та інші ключові компоненти (рисунок 1.11) [12]. Також є підтримка

параметричного моделювання, що дає змогу легко змінювати розміри або форми деталей, які автоматично пристосовуються до вимог проекту. Це особливо корисно під час розробки корпусу БПЛА (рисунок 1.12) [12]. Використовуючи параметричне та поверхневе моделювання, можна точно налаштувати форму і структуру кожної деталі, щоб зробити БПЛА максимально легким і аеродинамічним.

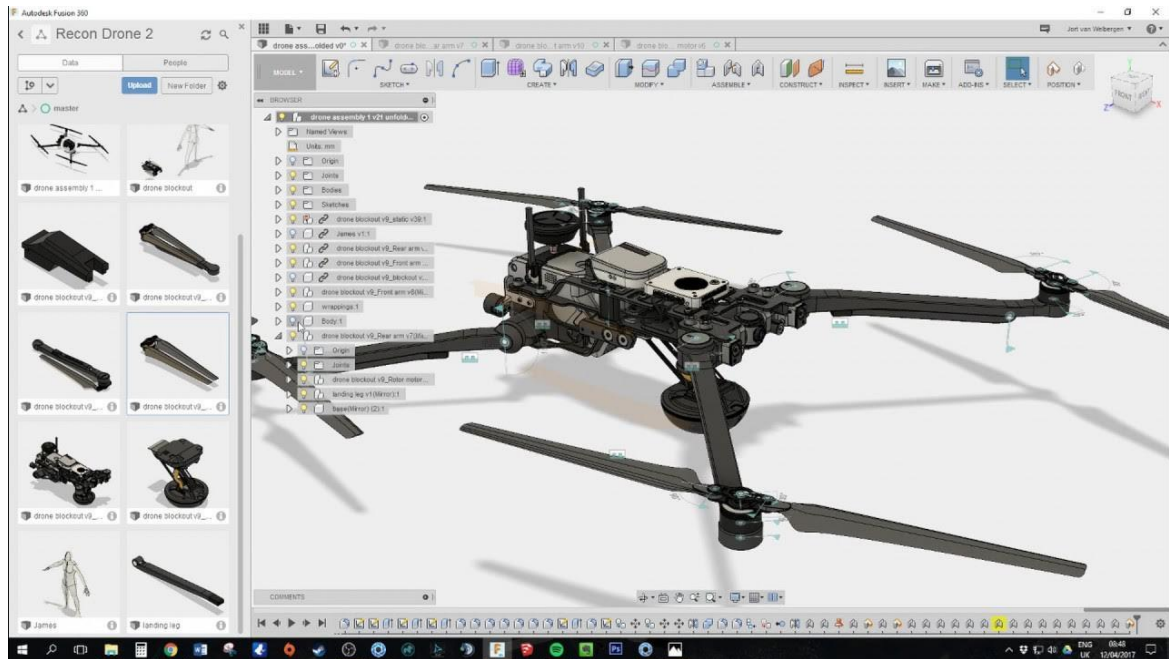


Рисунок 1.11 – 3D-модель БПЛА, розробленого у ПЗ Autodesk Fusion 360 Software [12]

ПЗ підтримує симуляції, які дозволяють протестувати конструкцію БПЛА під навантаженням, наприклад, у польоті або під час приземлення. Це особливо корисно для перевірки надійності та міцності БПЛА ще на етапі проектування, щоб зменшити ймовірність пошкоджень у реальних умовах. Інструменти для оптимізації топології дозволяють покращити вагу і форму конструкції, створюючи легкі та міцні деталі, що важливо для БПЛА, яким потрібен тривалий час польоту.

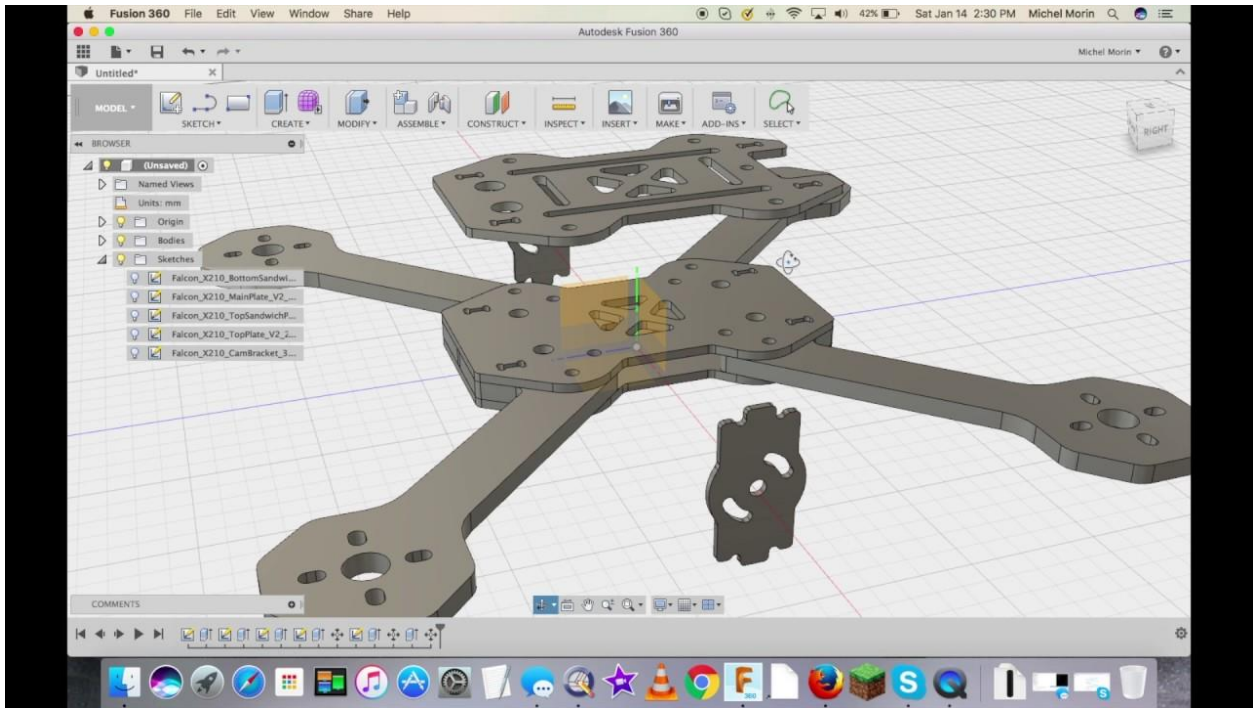


Рисунок 1.12 – 3D-модель корпусу БПЛА,  
розробленого у ПЗ Autodesk Fusion 360 Software [12]

Функції САМ в Fusion 360 допомагають швидко підготувати модель до виробництва, налаштовуючи шляхи обробки для фрезерування чи 3D-друку, що дозволяє створити фізичний прототип БПЛА з мінімумом часу і затрат. А завдяки інтеграції з хмарою, інженери можуть працювати над проектом одночасно, де б вони не були, відслідковуючи зміни в режимі реального часу та легко ділитися результатами роботи для спільного вдосконалення дизайну.

### 1.7 Висновки до першого розділу

Проведено аналіз літератури стосовно видів БПЛА, особливостей їх розробки з урахуванням призначення, технічних характеристик і можливостей. Розглянуто основні поняття у напрямку створення БПЛА, проведений аналіз вимог до конструкції, вибору матеріалів і економічно-екологічного обґрунтування.

Розглянуто основні види БПЛА, їх технічні характеристики та критерії класифікації за призначенням і конструктивними особливостями, а також

можливості застосування в гуманітарних і медичних місіях, включаючи пошук постраждалих, екстрену доставку медикаментів та обладнання.

З'ясували, що існують компанії, які цілеспрямовано займаються розробкою БПЛА та використанням їх у критичних та надзвичайних ситуаціях, а також використовують їх у сільськогосподарських роботах, для аналізу місцевості та полів з культурами.

Додатково проаналізували програмне забезпечення для створення 3D-моделей БПЛА, зосередившись на інструментах SolidWorks, Blender та CATIA. Таким чином, забезпечено комплексний підхід до вивчення технічних, гуманітарних і програмних аспектів розробки та використання БПЛА.

## 2 ВИБІР ТА МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ РОЗРОБЛЮВАНОВОГО БПЛА

### 2.1 Типи рам БПЛА

Перед тим, як почати моделювати, насамперед необхідно вибрати раму. Для створення БПЛА можна використовувати різні типи рам і конфігурації. Тому розглянемо поширені типи рам, а також питання проектування.

#### 2.1.1 Трикоптери

БПЛА, який має три промені, кожен з яких з'єднаний з двигуном називають трикоптером. Передньою частиною трикоптера прийнято вважати бік стику двох променів (Y3). Кут між променями може змінюватись, але, як правило, він становить  $120^\circ$ . Щоб протидіяти гіроскопічному ефекту нерівномірного числа роторів, а також зміні кута повороту, задній двигун повинен мати можливість обертатися (досягається установкою серводвигуна). Щоб виключити зі складання застосування сервоприводу, використовують конструкцію Y4, яка має співвісну установку додаткового мотора на задньому промені (рисунок 2.1) [13].

Перевагою може стати незвичайний зовнішній вигляд БПЛА. Найкращих льотних характеристик досягає при польоті у прямому напрямку.

Асиметрична конструкція може бути недоліком. Вона потребує застосування сервоприводу. Може з'явитись складність виконання заднього променя, оскільки сервопривід має бути встановлений уздовж осі. Також не всі польотні контролери підтримують таку конфігурацію.



Рисунок 2.1 – Приклад рами БПЛА Трикоптера [13]

### 2.1.2 Квадрокоптер

Квадрокоптер – це БПЛА, який має чотири промені, кожен з яких з'єднаний з мотором. Для "X конфігурації" передньою частиною квадрокоптера прийнято вважати бік стику двох променів, для "+ конфігурації" передом може вважатися поздовжній промінь (рисунок 2.2) [13].

Перевагами може бути найпоширеніший мультироторний дизайн, найпростіша та універсальна конструкція. У стандартній конфігурації промені/мотори симетричні щодо двох осей, та усі доступні на ринку контролери польоту можуть працювати з таким мультироторним складанням.

Відсутність надмірності є його недоліком. Якщо у системі відбувається збій, особливо у елементах силової установки, БПЛА падає.



Рисунок 2.2 – Приклад рами БПЛА квадрокоптера [13]

### 2.1.3 Гексакоптер

Гексакоптер має шість променів, кожен із яких з'єднаний з мотором. Передньою частиною гексакоптера прийнято вважати бік стику двох променів, але також передом може вважатися і поздовжній промінь.

За необхідності конструкція гексакоптера дозволяє легко додати два додаткові промені і мотори, що дозволить збільшити сумарну тягу, внаслідок чого БПЛА зможе підняти більше корисного навантаження. У разі відмови одного з моторів допускається ймовірність, що зможе здійснити м'яку посадку, а не розбитися. Модульна конструкція рами та контролери підтримують цю конфігурацію (рисунок 2.3) [13].

Громіздка та дорога конструкція стануть недоліком. Додаткові двигуни та деталі збільшують вагу коптера, відповідно щоб отримати довшу тривалість польоту, що і у квадрокоптера, необхідно встановлювати більш ємні АКБ.

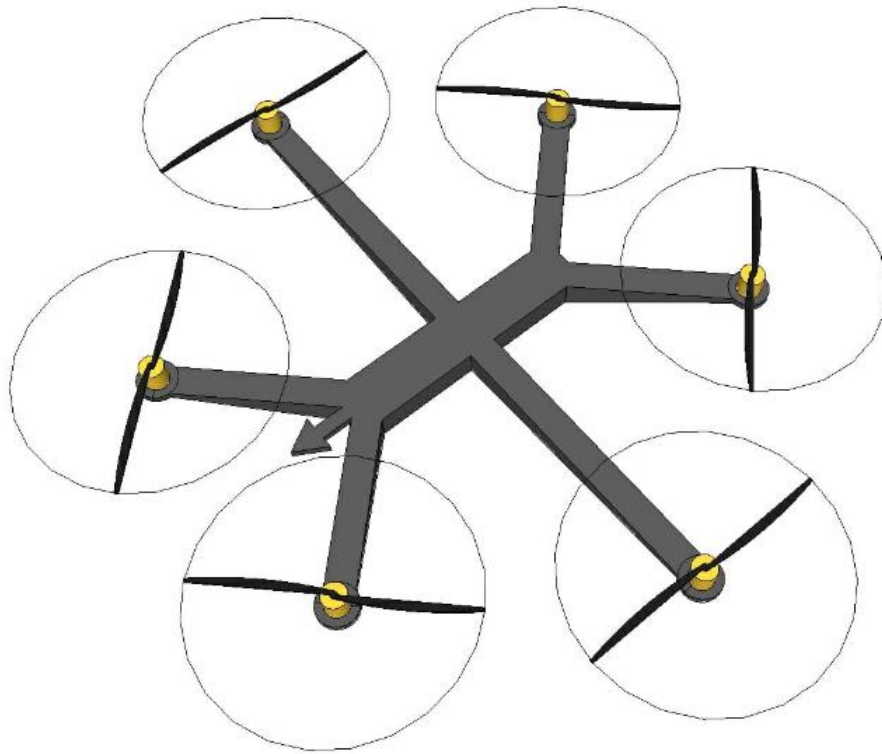


Рисунок 2.3 – Приклад рами БПЛА гексакоптера [13]

#### 2.1.4 Конструкція Y6

Конструкція Y6 є типом гексакоптера, у якого в основі не шість променів, а три, кожен з яких з'єднаний з парою співвісно встановлених моторів (всього 6 моторів). При цьому варто звернути увагу на те, що нижні пропелери проєктують тягу вниз (рисунок 2.4) [13].

Перевагами Y6 є найменша кількість компонентів у порівнянні з гексакоптером. Він піднімає більше корисного навантаження порівняно з квадрокоптером. Під час використання гвинтів із зустрічним обертанням виключається гіроскопічний ефект. У разі відмови одного з моторів допускається ймовірність, що БПЛА зможе здійснити м'яку посадку, а не розбитися.

Y6 Дорожчий порівняно з квадрокоптером через використання додаткових деталей, рівноцінних за вартістю деталям гексакоптера. Додаткові мотори та деталі збільшують вагу коптера, а значить, щоб отримати той самий час польоту, що й у квадрокоптера, необхідно використовувати акумуляторне батарею більшої ємності. Як показує практика, тяга отримана на Y6, трохи

нижче, ніж у звичайного гексакоптера, ймовірно, тому, що нижній гвинт впливає на тягу верхнього гвинта. Не всі польотні контролери підтримують таку конфігурацію.



Рисунок 2.4 – Приклад рами БПЛА конструкції Y6 [13]

#### 2.1.5 Октокоптер

У октокоптера вісім променів, кожен із яких з'єднаний з мотором. Передньою частиною гексакоптера прийнято вважати бік стику двох променів (рисунок 2.5) [14].

Перевага його – це більше моторів, більше тяги, і відповідно більше зайвого, що дозволяє БПЛА переміщатися з важкими та дорогими DSLR камерами.

Недоліками октокоптера може бути його ціна: чим більше двигунів – тим більш висока ціна та великий АКБ.

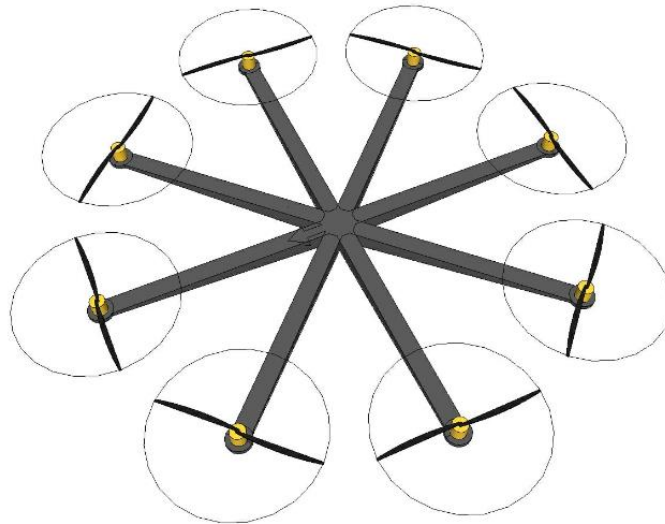


Рисунок 2.5 – Приклад рами БПЛА октокоптера [13]

#### 2.1.6 Конструкція X8

Конструкція X8, як і раніше, є октокоптером, тільки не з вісьмома, а з чотирма променями, кожен з яких з'єднаний з парою співосно встановлених моторів (всього 8 моторів) (рисунок 2.6) [14].

Недоліками конструкції X8 може стати велика кількість двигунів: вона дає більшу тягу, але відповідно підвищується ціна. Ця конструкція дозволяє підвищити шанси здійснити м'яку посадку БПЛА в разі збою двигуна

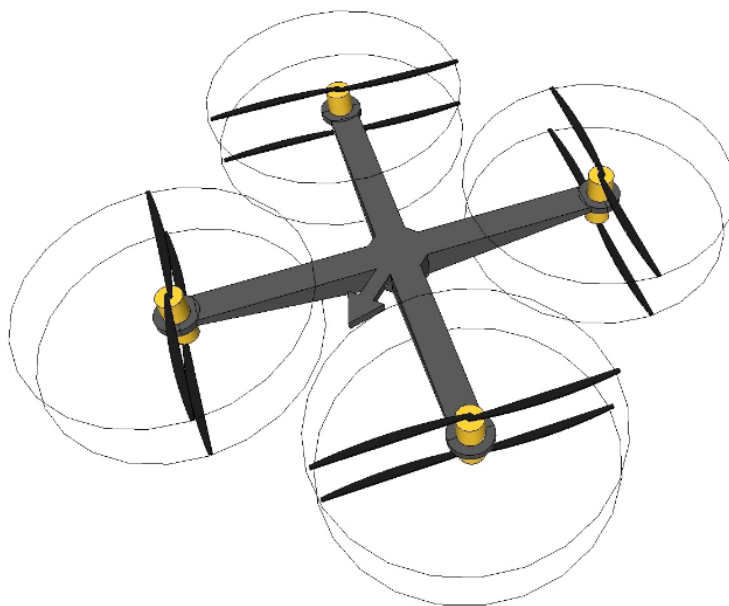


Рисунок 2.6 – Приклад рами БПЛА конструкції X8 [13]

### 2.1.7 Октокоптер для гуманітарної допомоги

Вибір октокоптера для моделювання БПЛА гуманітарної допомоги обґрунтований кількома важливими факторами.

По-перше, октокоптери мають велику вантажопідйомність, що дозволяє перевозити важкі вантажі, такі як медикаменти, продукти харчування або інші необхідні ресурси. Це особливо важливо в умовах гуманітарних місій, де може бути необхідно доставити допомогу в важкодоступні місця.

По-друге, завдяки своїй конструкції з восьми роторами, октокоптери забезпечують стабільність в польоті, що є критично важливим для точного скидання вантажів або проведення спостережень. Їх здатність до вертикального зльоту та посадки дозволяє уникати обмежень, пов'язаних із стандартними злітно-посадковими смугами.

Крім того, октокоптери можуть мати розширені можливості, такі як оснащення камерами для моніторингу території або датчиками для збору даних, що може суттєво полегшити управління гуманітарними операціями. Загалом, вибір октокоптера виглядає обґрунтованим, оскільки він поєднує в собі ефективність, універсальність і надійність, що робить його ідеальним рішенням для гуманітарної допомоги.

## 2.2 Створення 3D-моделі БПЛА у Autodesk Fusion 360 Software

Програмне забезпечення Autodesk Fusion 360 є універсальним продуктом для розробки та супроводу продукту на всіх етапах, від тривимірного моделювання до виготовлення. Нижче представлені основні можливості:

- тривимірне моделювання, CAD;
- рендер;
- креслення;
- анімація;
- система контролю версій;
- підготовка керуючих програм для верстатів, CAM.

Сховище Fusion є хмарним продуктом, усі проекти та файли зберігаються на серверах Autodesk, при цьому можна експортувати файли до локального ПК. Також можна створювати групові проекти, щоб контролювати доступ до ваших проектних даних та створювати проект командою.

У Autodesk Fusion 360 тривимірне моделювання базується на інструментах для створення та редагування геометрії, що дозволяє дизайнерам і інженерам перетворювати ідеї в цифрові 3D-об'єкти. Процес моделювання тут поділяється на кілька основних етапів:

- початкова побудова форми;
- детальне моделювання;
- редагування;
- уточнення.

Створення форми починається з ескізів – двовимірних креслень, які перетворюються в тривимірні об'єкти за допомогою інструментів екструзії, обертання, вирізання або додавання. Після побудови основної форми можна додавати до неї складні деталі:

- філе;
- фаски;
- перфорації;
- декоративні елементи.

ПЗ Fusion 360 надає кілька методів моделювання, зокрема параметричне та пряме. Параметричне моделювання дозволяє контролювати розміри та параметри моделі, щоб легко змінювати її навіть на пізніх етапах. Пряме моделювання корисне для швидкого редагування, коли потрібно вносити зміни без прив'язки до початкових параметрів. Також підтримує моделювання поверхонь і сітчастих структур. Моделювання поверхонь використовується для створення об'єктів з більш органічними або складними формами, наприклад, автомобільних панелей чи корпусів побутових приладів. Сітчасті структури дозволяють створювати об'єкти з низькою масою, але з високою

міцністю, часто застосовуються в проектуванні медичних імплантатів чи елементів для авіації (рисунок 2.7-2.8).

На рисунку 2.7-2.9, можна побачити, як завдяки ескізу, було створено руку БПЛА з отворами для кріплення до основної частини та мотора, і саму основну частину.

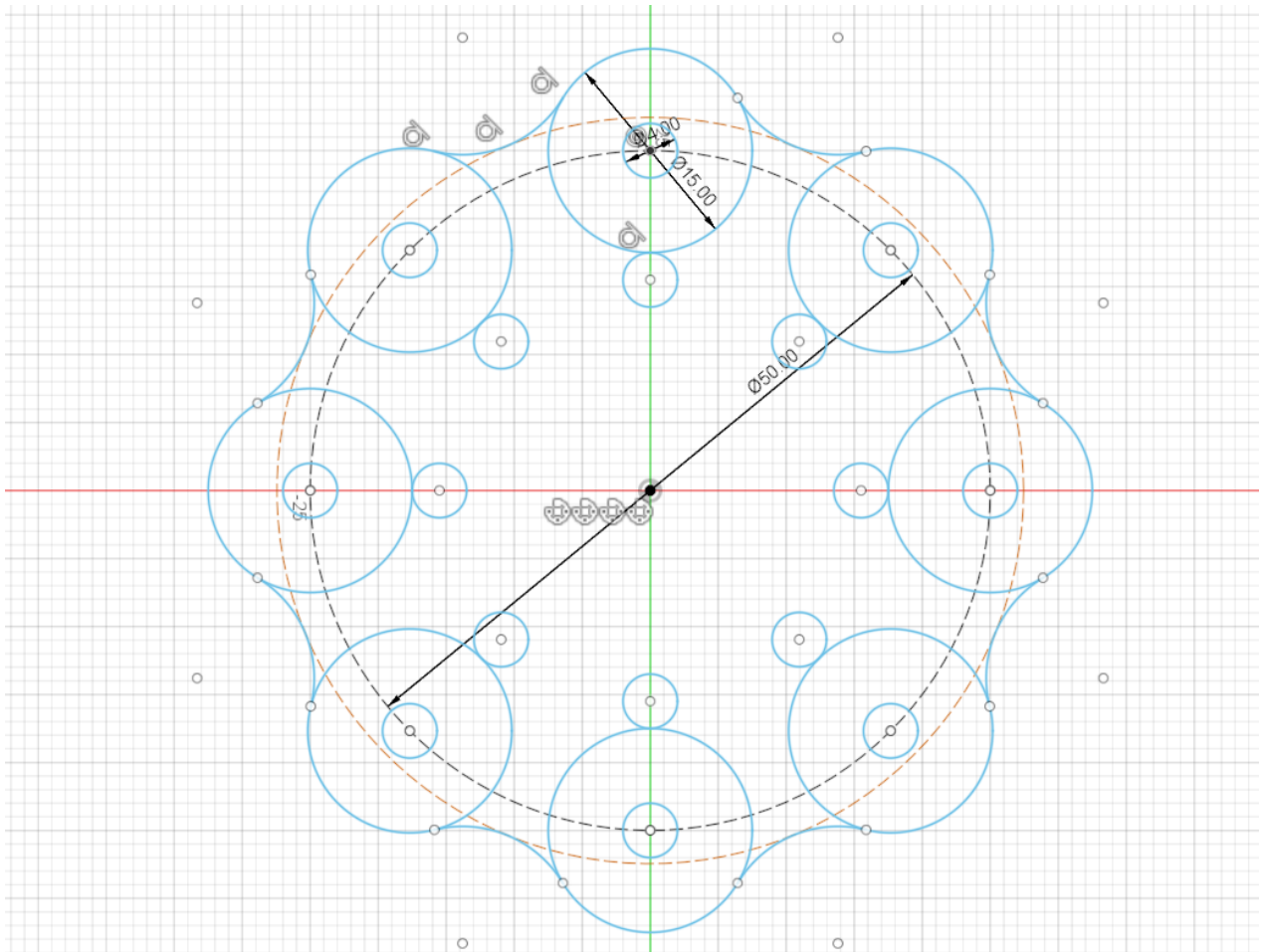


Рисунок 2.7 – Ескіз для подальшого моделювання основної частини БПЛА, побудований у ПЗ Autodesk Fusion 360

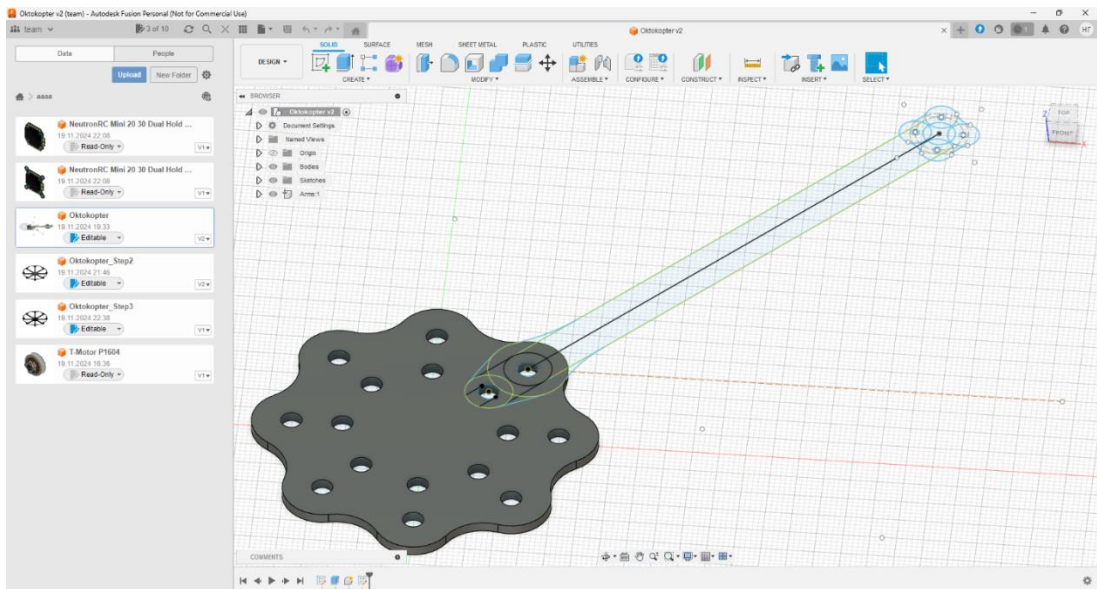


Рисунок 2.9 – Моделювання руки БПЛА, побудована завдяки ескізу у ПЗ Autodesk Fusion 360

Після розробки ескізу, який має точні розміри, можна почати моделювати сам об'єкт розробки. На рисунку 2.10 можна побачити усі частини БПЛА які будуть у подальшому з'єднані між собою.

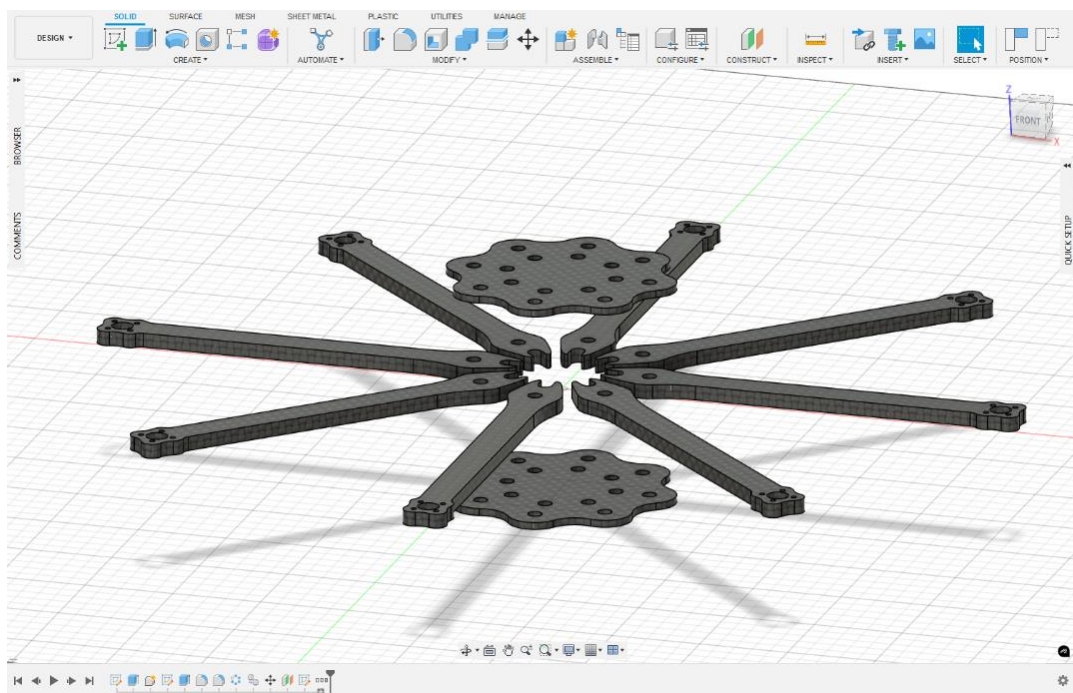


Рисунок 2.10 – Окремі частини БПЛА змодельовані у ПЗ Autodesk Fusion 360

Після проведення усіх операцій можна побачити готовий результат, на якому видно як буде виглядати БПЛА-октокоптер, для виконання гуманітарних місій.

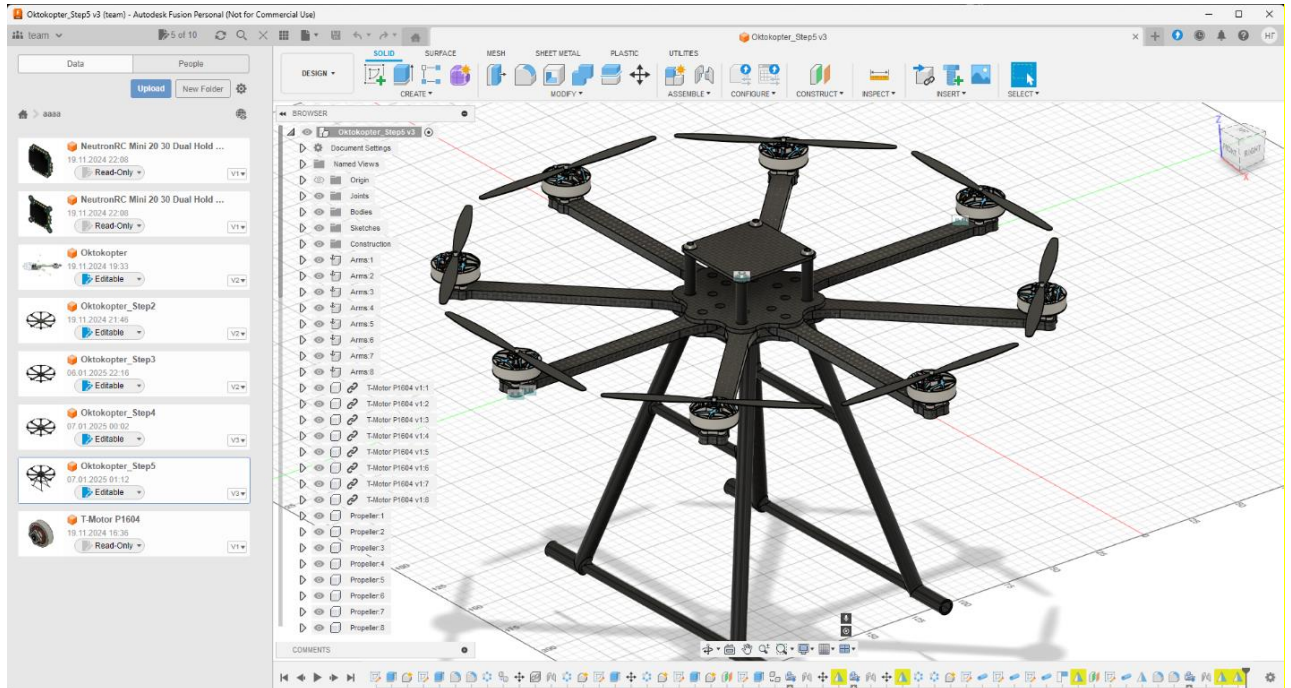


Рисунок 2.11 – 3D-модель БПЛА для гуманітарної допомоги, побудована у ПЗ Autodesk Fusion 360

### 2.3 Заходи з безпеки життєдіяльності та екології для безпілотних літальних апаратів

Під час експлуатації безпілотних літальних апаратів заходи безпеки мають особливе значення, оскільки ці системи працюють у середовищах, де їх діяльність може впливати на людей, техніку та навколишнє середовище. Для забезпечення належного рівня безпеки та мінімізації ризиків необхідно врахувати комплекс заходів. Передусім, слід забезпечити безпеку операторів та обслуговуючого персоналу. Це передбачає проведення регулярного інструктажу персоналу щодо правил експлуатації, технічного обслуговування та дій у разі аварійних ситуацій. Також необхідно використовувати засоби індивідуального захисту, особливо під час роботи з потенційно небезпечними

компонентами, такими як акумуляторні батареї або високовольтні системи живлення.

Авіаційна безпека вимагає уникнення польотів у заборонених чи небезпечних зонах, включаючи зони аеропортів, військових об'єктів і густонаселених районів без отримання спеціальних дозволів. Важливим елементом є застосування систем автоматичного уникнення зіткнень з іншими літальними апаратами або об'єктами в повітрі. Технічна безпека забезпечується регулярним технічним обслуговуванням, яке запобігає виходу з ладу компонентів БПЛА, а також використанням надійного програмного забезпечення, здатного зменшити ймовірність системних збоїв.

Особливу увагу слід приділити екологічній безпеці. Заходи включають застосування акумуляторів із низьким рівнем токсичності, які можна переробляти або безпечно утилізувати, а також контроль рівня шуму БПЛА для зменшення його впливу на мешканців населених пунктів. Необхідно уникати забруднення навколишнього середовища за умови аварійних ситуацій, таких як витік хімічних речовин чи падіння апарату у природні водойми.

Важливим аспектом екологічної відповідальності є також енергозбереження. Зниженню енергоспоживання сприяють використання енергоефективних двигунів і компонентів, а також впровадження алгоритмів оптимізації маршрутів польоту. Для забезпечення готовності до аварійних ситуацій необхідно розробляти плани реагування, які включають швидке знешкодження небезпечних компонентів і відновлення роботи системи. У разі непередбачених обставин звести до мінімуму ризик пошкодження майна чи шкоди людям дозволяє обладнання БПЛА системами аварійного завершення польоту.

Варто зазначити, що такий комплексний підхід до безпеки життєдіяльності та екології забезпечує не лише ефективну роботу БПЛА, але й мінімізує їхній вплив на навколишнє середовище та знижує ризики для людей і техніки.

## 2.4 Висновки до другого розділу

У даному розділі було розглянуто основні моделі БПЛА, які підходять для гуманітарних місій. Із багатьох представлених варіантів було обрано модель БПЛА-октокоптера, який, зокрема:

- має велику вантажопідйомність, що дозволяє перевозити важкі вантажі, такі як медикаменти, продукти харчування або інші необхідні ресурси;

- завдяки своїй конструкції, забезпечує стабільність у польоті;

- має розширені можливості, такі як оснащення камерами для моніторингу території або датчиками для збору даних.

Також на основі проведеного аналізу було обрано програмне забезпечення Autodesk Fusion 360. Його можливості допомагають не тільки побудувати модель, а й забезпечити комплексний підхід до проектування, спроможність створити моделі по ескізах та наприкінці розробки виконати симуляцію механічних, теплових та інших навантажень на модель, а також створювати анімацію роботи окремих компонентів або процесів взаємодії конструктивних елементів під час експлуатації.

Після вибору ПЗ була створена модель БПЛА октокоптера для гуманітарної місії. Побудовані ескізи та змодельовані окремі частини октокоптера.

## 3 ВИБІР КОМПОНЕНТІВ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ОКТОКОПТЕРА

### 3.1 Компонування коптера

#### 3.1.1 Двигун T-MOTOR 2207

Як двигун для октокоптера обираємо T-MOTOR 2207. Це один із популярних варіантів для БПЛА, які потребують високої потужності, стабільності та надійності (рисунок 3.1) [16]. Він потужний і універсальний, його можна адаптувати для використання в компактному октокоптері довжиною 270 мм, призначеному для перевезення невеликих вантажів. Завдяки поєднанню великого статора (22 мм у діаметрі та 7 мм у висоту) і якісних матеріалів, цей двигун забезпечує високу продуктивність, достатню щоб підіймати і перевозити вантаж.



Рисунок 3.1 – Двигун T-MOTOR 2207 1950KV [16]

Мультироторні безпілотні літальні апарати на електричних двигунах вирізняються високою стабільністю, простотою налаштування та стабілізації, а також меншою вагою. Основним недоліком електродвигунів є обмежена

енергоємність, що негативно впливає на тривалість і швидкість польоту мультироторів. Проте сучасні технології та інновації дозволяють майже повністю усунути цей недолік, а в деяких випадках навіть перевершити двигуни внутрішнього згоряння за швидкістю та тривалістю польоту.

Електричні двигуни постійного струму поділяються на дві основні групи:

- двигуни з щітковим збудженням;
- безщіткові двигуни постійного струму.

Безколекторні двигуни є електричними двигунами, реалізованими у вигляді замкнутої системи, що включає датчик для визначення положення ротора, координатний перетворювач (систему керування) та інвертор (силовий напівпровідниковий перетворювач) (рисунок 3.2) [16].

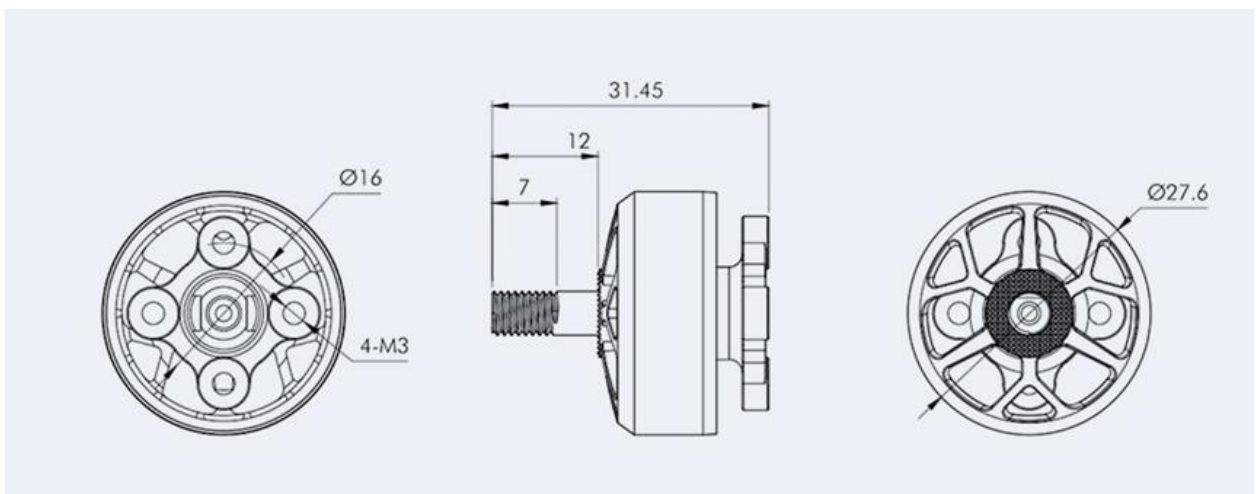


Рисунок 3.2 – Схема безколекторного двигуна T-MOTOR 2207 1950KV [16]

Щіткові двигуни використовують щітково-колекторний механізм для комутації струму в обмотках ротора, відрізняються простотою конструкції та управління, але потребують обслуговування через знос щіток і мають підвищений рівень шуму. Безщіткові двигуни не мають щіток і колектора, замість цього використовують електронну комутацію. Вони характеризуються високою ефективністю, тривалим ресурсом роботи, низьким рівнем шуму та

меншим нагрівом, що робить його оптимальним вибором для сучасних безпілотних літальних апаратів.

T-MOTOR 2207 1950KV дуже добре підходить для створення балансу між тягою, ефективністю та загальною вагою конструкції (рис. 3.3 – рис. 3.5) [16]. Двигун T-MOTOR 2207 може забезпечити стабільну тягу від 1,2 кг до 1,5 кг на кожен двигун (залежно від вибору пропелерів і напруги батареї). Це означає, що сумарна тяга восьми двигунів перевищуватиме вагу БПЛА з вантажем, забезпечуючи запас для маневрів і стабільного польоту.

Для використання цього двигуна в транспортному октокоптері було обрано версію з нижчими обертами на вольт – 1950KV, що оптимально для роботи з 6S батареєю. Низька кількість обертів на вольт дозволяє використовувати більші пропелери, які створюють більше тяги за меншого споживання енергії, що важливо для перевезення вантажів.

Конструкція двигуна має високоякісні магніти та підшипники, що забезпечують плавну та стабільну роботу навіть під великими навантаженнями. Корпус із алюмінієвого сплаву ефективно розсіює тепло, знижуючи ризик перегріву під час тривалих польотів із вантажем. Крім того, двигун сумісний із широким діапазоном пропелерів, зокрема 5–6 дюймів, що дозволяє налаштувати систему під специфічні потреби.

Двигун здатний виробляти значну тягу за помірного споживання струму. Це важливо для БПЛА, які виконують завдання з перевезення. Крім того, він має продуману конструкцію, яка захищає його від бруду та пошкоджень, що важливо під час польотів у складних умовах.

Двигун T-MOTOR 2207 є оптимальним вибором для використання в конструкції октокоптера. Завдяки високій потужності, стабільним робочим характеристикам і тривалому ресурсу експлуатації, він забезпечує надійність та ефективність роботи навіть у складних експлуатаційних умовах.

Протестовано	Тяга (г)		Струм (А)		Напруга		Перепустка високих оборотів			Ефективність	
	Max(g)	Avg Max(g)*	Max (A)	Avg Max(A)*	Avg Min(V)*	Max(V)	Max	Min	Avg Max*	Watts	G/W
HQProp 5x4GF	1032	1023	101.50	20.20	14.96	16.66	30943	29970	30257	302	3.4
GemFan 5x4.5BN	1120	1115	94.60	21.74	14.95	16.63	30287	29254	29630	325	3.4
GemFan 5x4.5x3	1123	1119	116.70	24.59	14.71	16.59	28957	28011	28228	362	3.1
HQProp 5x4x3GF	1216	1202	104.60	24.99	14.69	16.61	29556	28011	28255	367	3.3
GemFan 5x4.6BN	1245	1239	99.20	27.90	14.50	16.59	27649	26702	27022	404	3.1
DAL 5x4x4	1291	1267	89.80	26.98	14.52	16.56	28011	27039	27466	392	3.2
DAL 5x4.5x3HBN	1284	1276	116.70	26.99	14.61	16.67	28666	27210	27620	394	3.2
DAL 5x4.5x3BN	1371	1354	98.60	34.82	13.93	16.62	24989	24077	24421	485	2.8
HQ 6x4.5	1478	1459	92.70	32.91	14.03	16.53	25586	24630	25092	462	3.2
KingKong 6x4	1529	1514	116.40	30.37	14.28	16.56	26869	25740	26092	434	3.5

Рисунок 3.3 – Скріншот таблиці тестування тяги двигуна з різними пропелерами на максимальній потужності [16]

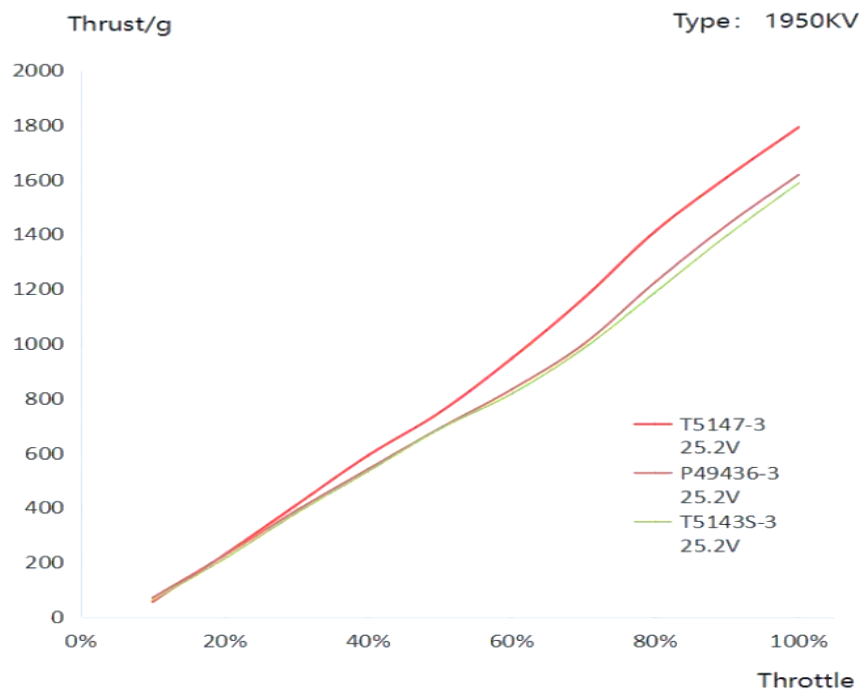


Рисунок 3.4 – Тестування тяги для безколекторного двигуна з показником 1950KV [16]

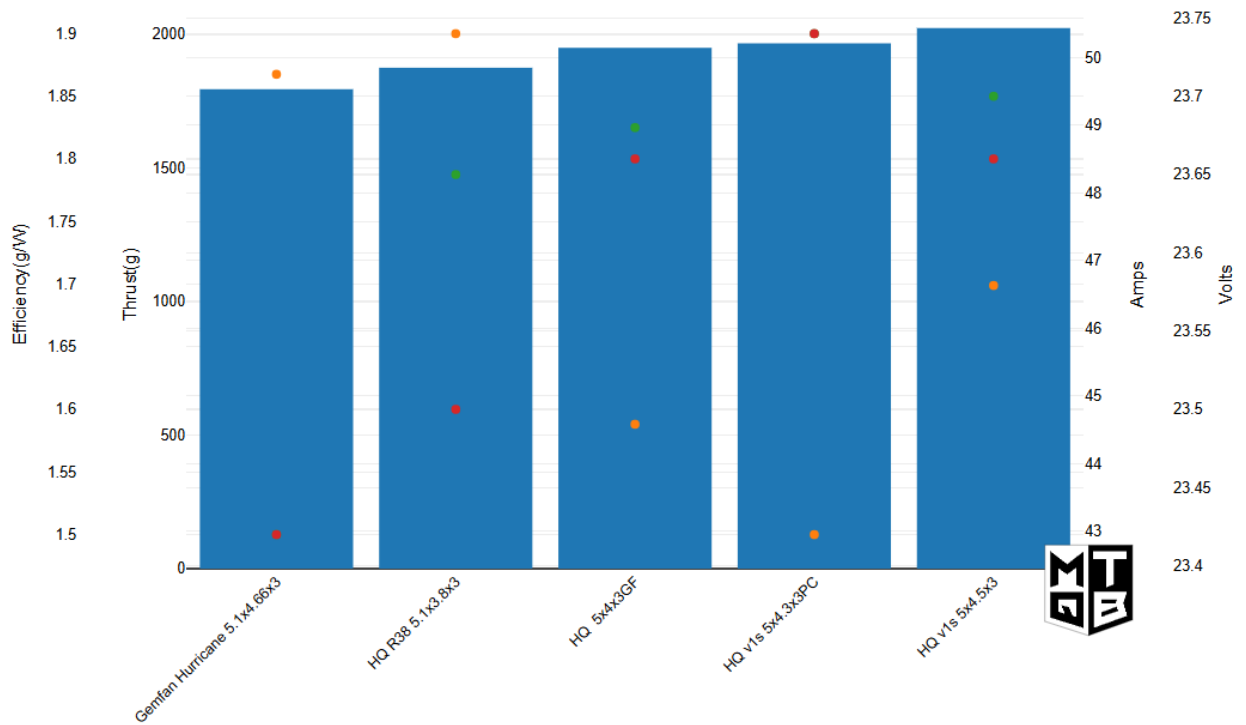


Рисунок 3.5 – Графік результату тестування двигуна з різними пропелерами на максимальній потужності [16]

### 3.1.2 Сенсори

Гіроскоп для октокоптера, що перевозить вантаж, вимірює кутову швидкість у трьох осях (X, Y, Z), що дозволяє контролеру польоту коригувати положення БПЛА, компенсуючи вплив вітру, нерівномірного розподілу вантажу або раптових змін руху (рисунок 3.6). Для таких завдань оптимальним вибором буде інтегрований гіроскоп у складі інерційного вимірювального модуля (IMU). Важливо зазначити, що гіроскоп безпосередньо не вимірює абсолютні кути, проте за допомогою ітеративних обчислень можна отримати приблизний кут, хоча, як і у випадку з акселерометром, можливий дрейф. Вихідні дані реального гіроскопа зазвичай подаються у вигляді аналогового сигналу або через інтерфейс I2C. Гіроскоп ICM-20948 має високу точність, низький рівень шуму та добре зарекомендував себе в системах стабілізації БПЛА. Також ICM-20948 має вбудований акселерометр і магнетометр.

Акселерометр використовується для вимірювання лінійних прискорень у трьох осях (X, Y, Z) (рисунок 3.6) [17]. Це дозволяє визначати положення

БПЛА відносно горизонту, компенсувати нахили, а також відслідковувати зміщення під час польоту. Також акселерометр допомагає враховувати інерцію вантажу під час різких маневрів, що важливо для безпечного керування. Встановлення акселерометра потребує захисту від вібрацій (демпфер або спеціальні кріплення), оскільки вібрації двигунів і пропелерів можуть спотворювати дані. Коректна інтеграція акселерометра з контролером польоту дозволяє забезпечити точний контроль орієнтації та компенсувати зміщення вантажу під час польоту.

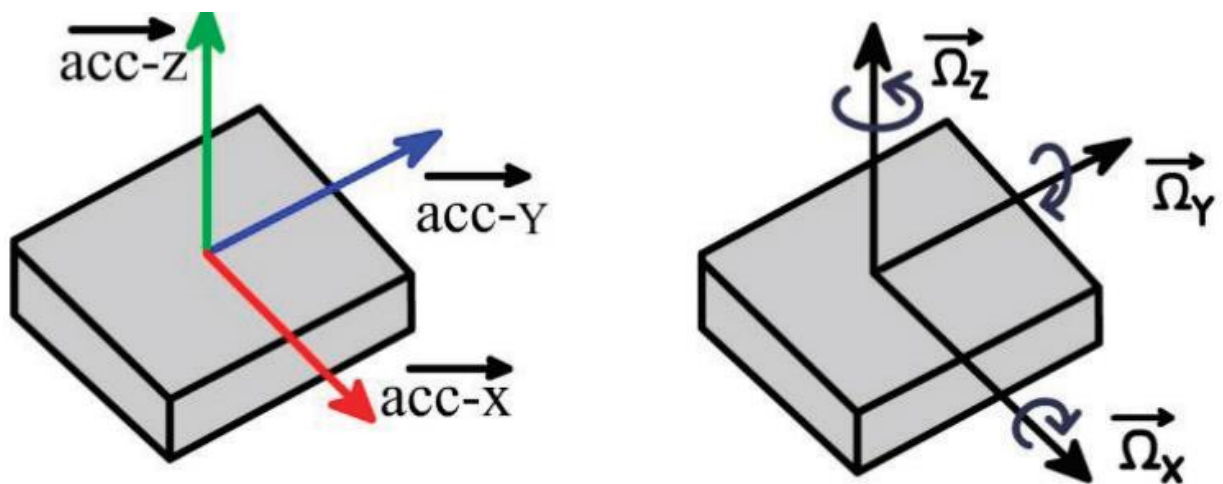


Рисунок 3.6 – Схема гіроскопа та акселерометра [17]

Компас і магнітометр для октокоптера, потрібен для визначення орієнтації БПЛА відносно магнітного поля Землі. Вони забезпечують стабільний політ по заданому курсу та коректну роботу GPS-навігації, зокрема функцій автоматичного повернення додому (RTH) або польоту за заданими точками маршруту. Модель трьохосового цифрового магнітометру HMC5883L забезпечує точне визначення напрямку і легко інтегрується з контролерами польоту, такими як Pixhawk або Ardupilot. HMC5883L має компактні розміри та малу вагу, що є важливим для невеликого октокоптера з вантажем. Щоб мінімізувати вплив магнітних перешкод, компас зазвичай встановлюється на піднятій мачті, подалі від двигунів і джерел струму, які

створюють електромагнітні поля. Правильне калібрування магнітометра перед кожним польотом є критично важливим для забезпечення точності орієнтації.

Барометр для октокоптера використовується для вимірювання атмосферного тиску, що дозволяє визначати висоту польоту. Він є ключовим компонентом системи автопілота для забезпечення стабільності по висоті, особливо за умови зависання з вантажем або виконання складних маневрів. Барометр BMP280 забезпечує високу точність і малий час відгуку. Його слід захищати від прямого потоку повітря, який створюється пропелерами, оскільки це може викликати хибні показники. Для цього сенсор часто покривають пористим матеріалом, наприклад, пінопластом.

### 3.1.3 Електроживлення октокоптера

Для забезпечення живлення октокоптера, який буде перевозити вантаж, було обрано акумуляторну батарею Tattu R-Line 6S 5000mAh 75C (рисунок 3.7) [18]. Вибір даної батареї обумовлений її високими технічними характеристиками, що відповідає вимогам до енергопостачання БПЛА в умовах виконання його основних завдань.

Батарея є літій-полімерною (LiPo), що забезпечує високу енергетичну щільність за відносно невеликої маси. Ця технологія дозволяє досягти оптимального співвідношення між ємністю та масою, що є критично важливим фактором для безпілотних літальних апаратів, зокрема для октокоптерів, які перевозять вантажі. Ємність батареї становить 5000 мА·год, що дозволяє зберігати достатній обсяг енергії для підтримки польоту БПЛА протягом тривалого часу навіть за наявності додаткового навантаження. Напруга батареї становить 22,2 В (6S), що забезпечує стабільне живлення моторів та інших компонентів октокоптера. Вибір напруги 6S пояснюється необхідністю підвищення ефективності енергоспоживання. Використання батареї з вищою напругою знижує струмове навантаження на систему, що

дозволяє зменшити теплові втрати, підвищити стабільність роботи електроніки та продовжити ресурс експлуатації акумулятора.



Рисунок 3.7 – Батарея Tattu R-Line 6S 5000mAh 75C [18]

Особливістю батареї Tattu R-Line є високий розрядний струм, батарея здатна забезпечувати максимальний розрядний струм до 375 А, це значно перевищує потреби системи навіть у пікових режимах роботи. Такий параметр гарантує стабільну роботу моторів і контролерів під час інтенсивного маневрування або за умови різкого зльоту з важким вантажем.

Маса батареї становить близько 800 г. Вона не створює надмірного навантаження на раму та не впливає негативно на маневреність літального апарата. Компактні розміри дозволяють легко інтегрувати батарею у конструкцію БПЛА без необхідності внесення змін до існуючого дизайну.

#### 3.1.4 Головний процесор до октокоптера

Для октокоптера з двигунами T-motor 2207 1950KV та акумулятором Tattu R-Line 6S 5000mAh 75C важливо обрати контролер, який здатний забезпечити належну обробку сигналів, ефективне управління потужними двигунами та стабільну роботу з великим акумулятором. Після аналізу

характеристик і потреб проекту було обрано процесор Betaflight F7 як найбільш підходящий варіант.

Betaflight F7 є потужним контролером, заснованим на процесорі STM32 F7, який здатний обробляти сигнали в реальному часі з мінімальною латентністю (рисунок 3.8) [19]. Це є ключовим фактором для БПЛА, що працюють із високими навантаженнями, такими як потужні двигуни та великі акумулятори. Завдяки високій продуктивності, Betaflight F7 здатний забезпечити стабільність і точність управління, що є необхідним для стабільного польоту за складних умов.

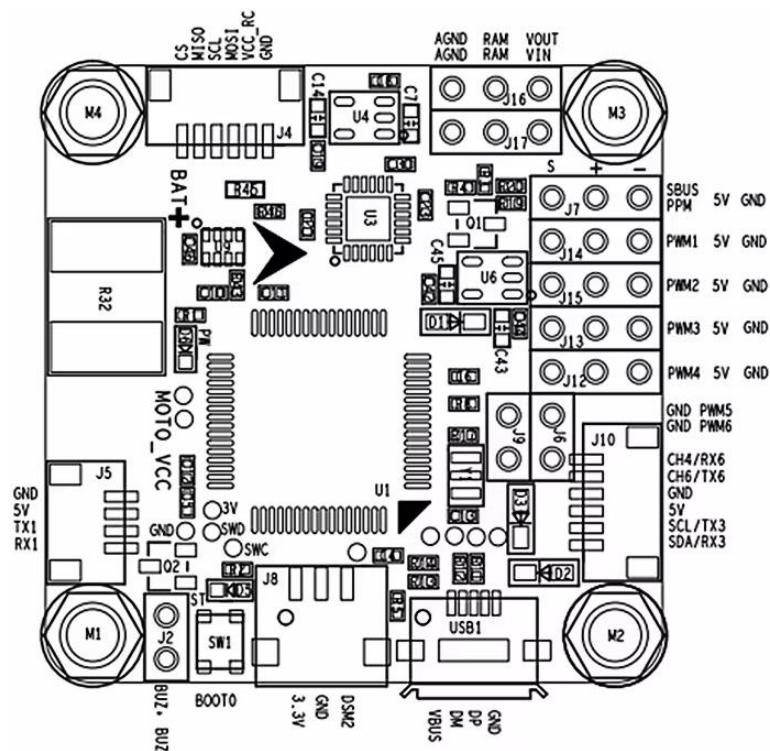


Рисунок 3.8 – Головний процесор: контролер польоту Betaflight F7 [19]

Ще однією важливою перевагою Betaflight F7 є його підтримка великої кількості датчиків та сенсорів, що дозволяє здійснювати точне налаштування контролера під різні умови польоту. Крім того, Betaflight має широке співтовариство, що забезпечує доступ до ресурсів і документації, що значно полегшує налаштування та підтримку.

Таким чином, на основі розгляду технічних характеристик і вимог до проєкту було обрано Betaflight F7 як головний процесор для цього октокоптера. Його висока продуктивність, підтримка потужних компонентів і гнучкість налаштувань робить його гарним вибором для забезпечення стабільності та надійності польоту.

### 3.2 Висновки до третього розділу

У цьому розділі було здійснено аналіз і вибір ключових апаратних компонентів для створення октокоптера, орієнтованого на ефективність, надійність і продуктивність. Вибір компонентів базувався на їх технічних характеристиках, сумісності та відповідності вимогам до конкретного завдання.

Було обрано двигун T-MOTOR 2207 1950KV, що забезпечує високу потужність, стабільність роботи та достатню тягу для забезпечення маневреності октокоптера. Висока якість та енергоефективність цих двигунів дозволяють оптимально використовувати ресурси батареї під час виконання складних завдань.

Як джерело живлення обрано акумулятор Tattu R-Line 6S 5000mAh 75C, який відзначається високою ємністю та здатністю видавати великий струм, необхідний для підтримки стабільної роботи двигунів та інших компонентів. Високий коефіцієнт розряду (75C) дозволяє витримувати пікові навантаження, що особливо важливо для БПЛА, які виконують інтенсивні маневри або працюють в умовах підвищених навантажень.

Для управління польотом і обробки даних було обрано головний процесор BETAFLIGHT Betaflight F7, який пропонує сучасну платформу для налаштування й оптимізації польотних характеристик. Його висока обчислювальна потужність дозволяє реалізовувати складні алгоритми стабілізації, навігації та управління, що забезпечує точність і адаптивність октокоптера до різних умов експлуатації.

## 4 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА

### 4.1 Опис функціонування системи керування БПЛА

Мета польоту за заданим маршрутом полягає в точному позиціонуванні октокоптера у просторі та мінімізації відхилень від траєкторії, що забезпечується керуванням його просторовими координатами  $X$ ,  $Y$  та  $Z$ . Це досягається шляхом комбінованої зміни швидкостей обертання двигунів.

Для керування польотом БПЛА на заданій траєкторії доцільно використовувати зміну швидкостей двигунів (або їх тяги) як керуючі впливи  $u_1, \dots, u_4$ . До контрольованих збурень можна віднести вагу октокоптера  $f_2$ . Всі інші впливи, за винятком керуючих дій і контрольованого збурення  $f_1$ , слід класифікувати як неконтрольовані збурення (рисунок 4.1).

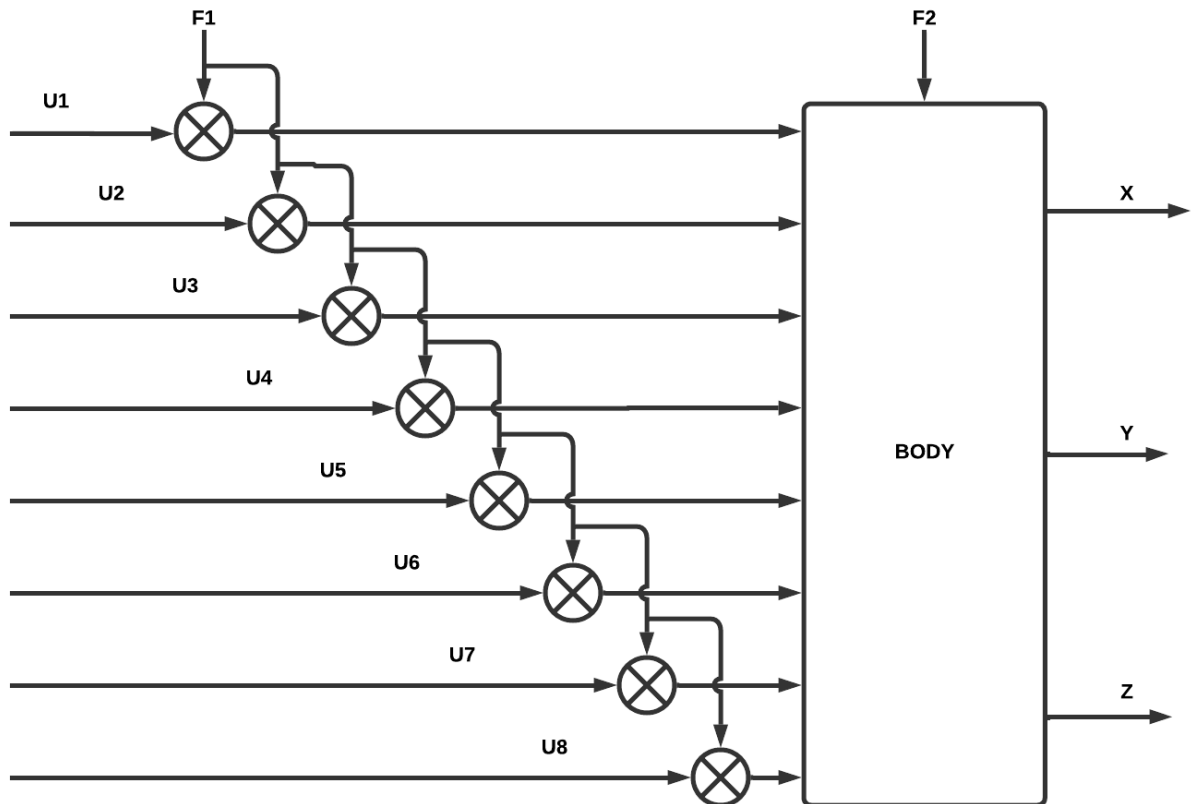


Рисунок 4.1 – Структурна схема октокоптера як об'єкта управління

Математична модель управління БПЛА ґрунтується на законах фізики. На октокоптер впливають такі фізичні явища, як аеродинаміка, моменти інерції, крутний момент, сила гравітації та гіроскопічний ефект. Переміщення БПЛА у просторі визначається результируючим вектором напрямку, який, у свою чергу, залежить від швидкості обертання кожного з восьми двигунів. Двигуни створюють тягу та крутний момент щодо центру мас конструкції октокоптера.

Октокоптери мають перевагу у підйомній силі та здатності нести важкі вантажі, що робить їх придатними для гуманітарних місій, зокрема доставки медичних засобів або провізії в ізольовані райони. Використання більшої кількості роторів також сприяє зниженню рівня вібрацій, що позитивно впливає на стабільність польоту та якість роботи сенсорного обладнання (рисунок 4.2).

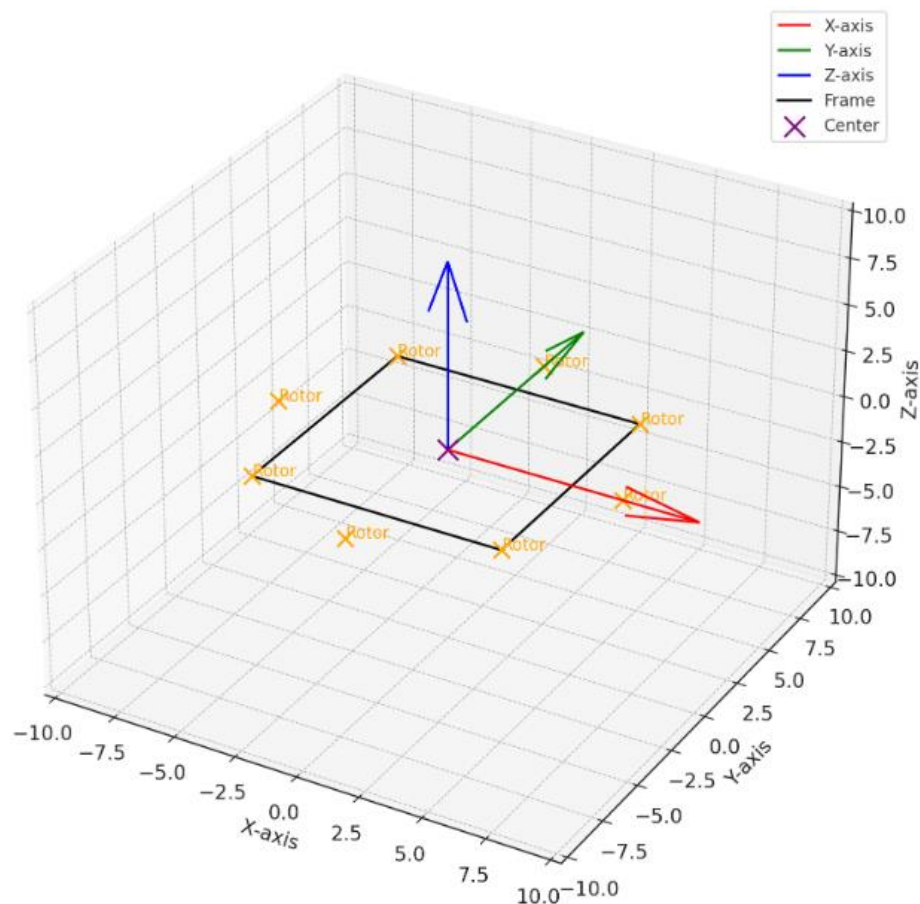


Рисунок 4.2 – Відображення системи координат октокоптера з позначенням осей і роторів

Показано складові октокоптера у тривимірній системі координат (рисунок 4.2):

- червона, зелена, синя стрілки представляють осі X, Y і Z відповідно;
- рама октокоптера має квадратну структуру, позначену чорними лініями;
- ротори розташовані на кутах рами, а також у проміжних позиціях уздовж осей для симетрії та збільшення підйомної сили (позначені помаранчевими точками);
- центр октокоптера позначено фіолетовою точкою.

Для управління октокоптером кожен рух координується через незалежне регулювання швидкостей обертання восьми роторів. Це дозволяє досягти високої стабільності, маневровості та точності управління, що критично важливо для виконання складних задач, таких як гуманітарні місії або операції в обмежених просторах (рисунок 4.3).

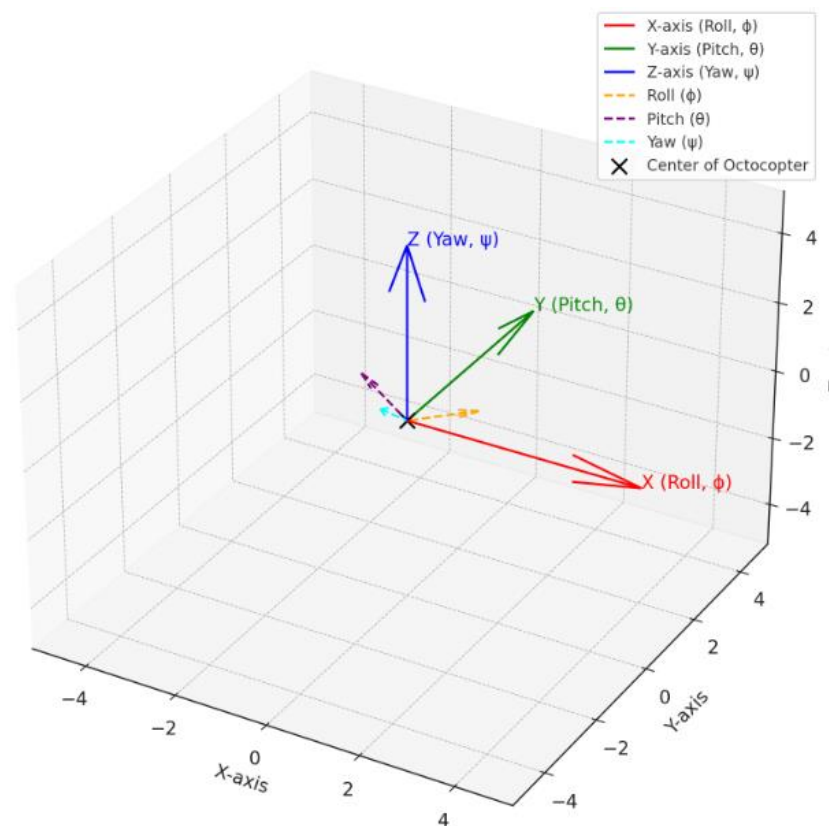


Рисунок 4.3 – Ілюстрація рухів октокоптера Roll, Pitch, Yaw у тривимірній системі координат

Основні рухи октокоптера забезпечуються наступним чином. Вони досягаються шляхом узгодженого збільшення або зменшення підйомної сили на всіх роторах. Суми сил ротора визначають загальну підйомну силу, яка піднімає або опускає апарат.

Тангаж ( $\theta$ ) використовується для нахилу вперед або назад, швидкість обертання передніх і задніх роторів змінюється, створюючи потрібний крутний момент навколо осі X.

Крен ( $\phi$ ) досягається зміною швидкостей обертання правих і лівих роторів. Це генерує крутний момент навколо осі Y, що дозволяє октокоптеру нахилитися вбік.

Рискання ( $\psi$ ) забезпечується реактивним моментом роторів, що обертаються у протилежних напрямках. Для обертання апарата навколо осі Z змінюється різниця крутних моментів між роторами, які обертаються за годинниковою стрілкою та проти неї.

На рисунку 4.3 Червона вісь (X): відповідає за рух Roll ( $\phi$ ) – обертання навколо осі X; зелена вісь (Y): відповідає за рух Pitch ( $\theta$ ) – обертання навколо осі Y; синя вісь (Z): відповідає за рух Yaw ( $\psi$ ) – обертання навколо осі Z. Додатково позначені напрями для кожного з типів обертання (пунктирними стрілками). Центр октокоптера позначено чорною точкою. Ця система координат демонструє, як відбуваються базові рухи та маневри апарата у просторі.

Відповідно до представленого фрагмента, для октокоптера, як і для квадрокоптера, основа динаміки польоту базується на регулюванні кутових швидкостей двигунів, що впливають на підйомну силу  $F_i$  та кінцевий крутний момент  $\tau_d$ .

Для октокоптера моторні пари, ймовірно, будуть організовані у чотири групи, кожна з яких включає два двигуни, що відповідають за один з напрямків руху – газ, крен, тангаж, рискання (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 – Робота двигунів з рівнем навантаження

Мотори	Газ	Крен	Тангаж	Рискання
Мотори 1, 5	1	2	1	2
Мотори 2, 6	2	1	2	1
Мотори 3, 7	3	4	3	4
Мотори 4, 8	4	3	4	3

Газ (підйомна сила) контролюється всіма моторами одночасно. Кожен мотор виконує свою роль у балансуванні підйому, щоб утримувати апарат на необхідній висоті.

Крен управляється через моторні пари, розташовані на протилежних сторонах (наприклад, мотори 1 і 5 змінюють швидкість для крену).

Тангаж залежить від балансування швидкостей між передніми та задніми моторами для нахилу вперед або назад.

#### 4.2 Основні параметри моделі

Двигун представляється як інерційна ланка першого порядку (аперіодична ланка), на вхід якого подається задане значення кутової швидкості, а на виході виходить поточне (вимірне) значення кутової швидкості обертання. Шляхом інтегрування кутової швидкості можна обчислити поточний кут повороту, якщо це потрібно. Тягова сила гвинтомоторними групами (ГМГ) пропорційна до квадрату кутової швидкості:

$$F_M(t) = C_T \cdot \omega^2(t);$$

$$M_M(t) = C_Q \cdot \omega^2(t),$$

де для обраної ГМГ:  $C_T = 2,02268 \cdot 10^{-4} \text{H} \cdot \text{c}^2$ ;

$M_M \approx 0 \text{H} \cdot \text{m} \cdot \text{c}^2$  – реактивний момент двигуна;

$\omega(t)$  – поточна кутова швидкість, рад/с.

Мультироторний апарат сприймається як тверде тіло, що має жорстку раму постійної маси. Він симетричний відносно трьох основних осей і має гвинтомоторну групу, закріплену в одній площині, розташованій у центрі мас пристрою. Усі двигуни жорстко закріплені відносно рами. Це дозволяє стверджувати, що радіус-вектори центрів і напрямки тягових сил для кожної гвинтомоторної групи є геометричними постійними у системі координат, пов'язаної з БПЛА. Іншими словами, сила  $F_M(t)$ , розрахована в моделі ГМГ, є модуль вектора сили, прикладеного до певної точки коптера у фіксованому напрямку. Цей напрямок може змінюватись у процесі польоту, відносно рами октокоптера та пов'язана з нею система координат залишаються незмінними.

Для опису руху використовується дві системи координат:

- нерухома інерційна система, пов'язана із Землею;
- рухома система, пов'язана з коптером.

Ці системи позначаються як I та B – від inertial – інерційний та body – тіло.

Осі систем спрямовані наступним чином:

- $x_I$  – праворуч
- $y_I$  – на спостерігача;
- $z_I$  – вниз;
- $x_B$  – праворуч вздовж променя першої гвинтомоторної групи;
- $y_B$  – на спостерігача вздовж променя третьої гвинтомоторної групи;
- $z_B$  – зверху вниз за стандартної орієнтації БПЛА.

Це можна побачити на рисунку 4.4.

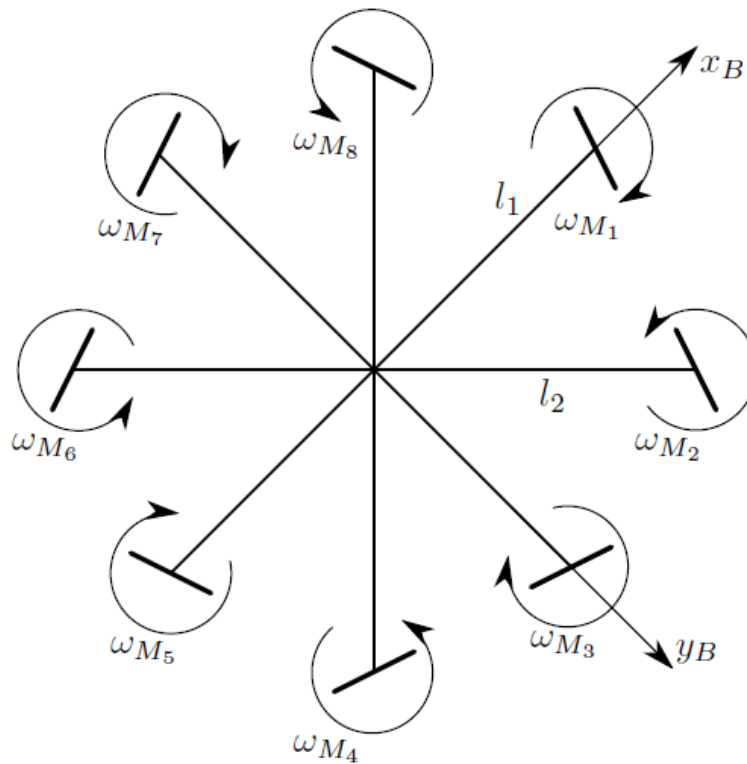


Рисунок 4.4 – Октокоптер з використанням 2 систем координат

### 4.3 Розрахунки двигуна T-MOTOR 2207 1950KV

Електрична частина двигуна визначає, як напруга на обмотках двигуна перетворюється у струм, враховуючи опір, індуктивність і протидію ЕРС. У таблиці 4.2 вказані характеристики двигуна.

Таблиця 4.2 – Характеристики двигуна T-MOTOR 2207 1950KV 6S

Параметр	Значення
Максимальна тяга	1570 – 1755 г
Напруга живлення	18,5 – 22,2 В
Номінальний струм	9,6 А
Піковий струм	41 А
Опір	64 мОм
Розміри	33 × 27,5 × 27,5 мм
Вага	32,4 г
Діаметр валу	4 мм
Максимальна тривалий струм	39,6 А
Максимальна тривала потужність	959 Вт

На рисунку 4.5 представлені основні сигнали та параметри САУ двигуна T-MOTOR 2207 1950kv, на ньому використані такі позначення:

- $U_0$  – вхідне значення напруги;
- $U_{\Pi}$  – напруга на вході підсилювача;
- $U_{\text{ЕП1}}$  та  $U_{\text{ЕП2}}$  – напруги на виходах елементів порівняння;
- $\varphi_{\text{ДВП}}$  – кут повороту двигуна виконавчого приводу;
- $\delta_H$  – кутова швидкість;
- $X_{\text{ОУ}}$  – переміщення об'єкта управління;
- $U_{\text{МЗЗ}}$  – напруга зворотного зв'язку;
- $U_{\text{ДП}}$  – напруга на виході датчика переміщення.

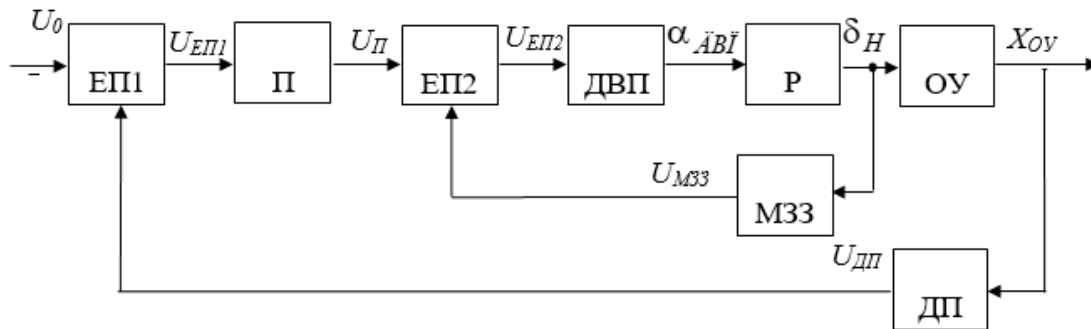


Рисунок 4.5 – Функціональна схема САУ двигуна T-MOTOR 2207 1950kv

Передавальна функція  $W_{\text{ЕП1}}(s)$ :

$$W_{\text{ЕП1}}(s) = \frac{K_{\text{ЕП1}}}{1 + T_{\text{ЕП1}}s}$$

де  $K_{\text{ЕП1}}$  – коефіцієнт підсилення;

$T_{\text{ЕП1}}$  – постійна часу.

Передавальна функція  $W_{\Pi}(s)$ :

$$W_{\Pi}(s) = \frac{K_{\Pi}}{1 + T_{\Pi}s}$$

де  $K_{\Pi}$  – коефіцієнт підсилення;

$T_{\Pi}$  – постійна часу.

Передавальна функція  $W_{\text{ЕП2}}(s)$ :

$$W_{\text{ЕП2}}(s) = \frac{K_{\text{ЕП2}}}{1 + T_{\text{ЕП2}}s},$$

де  $K_{\text{ЕП2}}$  – коефіцієнт підсилення;

$T_{\text{ЕП2}}$  – постійна часу.

Передавальна функція  $W_{\text{ДВП}}(s)$ :

$$W_{\text{ДВП}}(s) = \frac{K_{\text{ДВП}}}{1 + 2\varepsilon T_{\text{ДВП}}s + T_{\text{ДВП}}^2 s^2},$$

де  $K_{\text{ДВП}}$  – коефіцієнт підсилення;

$\varepsilon$  – коефіцієнт демпфування;

$T_{\text{ДВП}}$  – постійна часу.

Передавальна функція  $W_p(s)$

$$W_p(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right),$$

де  $K_p$  – коефіцієнт підсилення;

$T_i$  – постійна інтеграція.

Передавальна функція  $W_{\text{ОУ}}(s)$ :

$$W_{\text{ОУ}}(s) = \frac{K_{\text{ОУ}}}{1 + T_{\text{ОУ}}s},$$

де  $K_{\text{ОУ}}$  – коефіцієнт підсилення;

$T_{Oy}$  – постійна часу.

Передавальна функція  $W_{дп}(s)$

$$W_{дп}(s) = K_{дп}.$$

Якщо скласти усі ланки, то отримаємо передавальну функцію такого виду:

$$W_{пр}(s) = \frac{K_{ЕП1}}{1 + T_{ЕП1}s} \cdot \frac{K_{п}}{1 + T_{п}s} \cdot \frac{K_{ЕП2}}{1 + T_{ЕП2}s} \cdot \frac{K_{двп}}{1 + 2\varepsilon T_{двп}s + T_{двп}^2 s^2} \cdot K_p \left(1 + \frac{1}{T_{и}s}\right) \cdot W_{Oy}(s) = \frac{K_{Oy}}{1 + T_{Oy}s}.$$

Основні параметри системи автоматичного управління (САУ) двигуна наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Значення параметрів САУ двигуна T-MOTOR 2207 1950kv

$K_{двп}$	$T_{двп}$	$K_p$	$K_{Oy}$	$T_{Oy}$	$K_{дп}$	$\sigma$	$t_{рег}$	$C_1$
8	0,02	1/20	0,6	0,7	5	25	1,6	0,04

На основі цих параметрів будується передатна функція  $W_{Oy}(s)$ , яка описує динамічні властивості двигуна. Після підстановки відповідних значень параметрів  $K_{двп}$  і  $T_{двп}$  отримано спрощену форму передатної функції, яка використовується для подальшого моделювання та аналізу роботи двигуна у складі БПЛА:

$$W_{Oy}(s) = \frac{K_{Oy}}{1 + T_{Oy}s} = \frac{0,6}{1 + 0,7s}.$$

Підставляємо значення  $K_{двп} = 8$  та  $T_{двп} = 0,02$ , а також приймаємо  $\varepsilon = 1$  розрахунків. У результаті отримуємо такий вираз:

$$W_{\text{ДВП}}(s) = \frac{K_{\text{ДВП}}}{1 + 2\varepsilon T_{\text{ДВП}}s + T_{\text{ДВП}}^2 s^2} = \frac{8}{1 + 2 \cdot 1 \cdot 0,02 \cdot s + (0,02)^2 s^2} =$$

$$= \frac{8}{1 + 0,04s + 0,0004s^2}.$$

Перемножимо коефіцієнти:

$$W_{\text{ПР}}(s) = \frac{8}{1 + 0,04s + 0,0004s^2} \cdot 0,05 \cdot \frac{0,6}{1 + 0,7s};$$

$$W_{\text{ПР}}(s) = \frac{8 \cdot 0,05 \cdot 0,6}{(1 + 0,04s + 0,0004s^2)(1 + 0,7s)};$$

$$W_{\text{ПР}}(s) = \frac{0,24}{(1 + 0,04s + 0,0004s^2)(1 + 0,7s)};$$

$$W_{\text{ПР}}(s) = \frac{0,24}{(0,7s + 1)(0,0004s^2 + 0,04s + 1)}.$$

Схема моделювання побудована у середовищі Matlab Simulink та відображає модель системи автоматичного управління двигуном. Вона складається з вхідного сигналу, фільтра з передавальною функцією, основного блоку системи з передавальною функцією та виходу, що дозволяє спостерігати результат моделювання (рисунок 4.6).

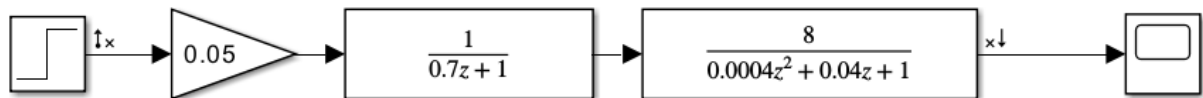


Рисунок 4.6 – Функціональна схема САУ двигуна T-MOTOR 2207 1950kv, побудована у Matlab Simulink

Для цієї схеми у Matlab Simulink можна побудувати амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) та фазо-частотну характеристику (ФЧХ). АЧХ демонструє залежність модуля передавальної функції від частоти, тоді як ФЧХ відображає зміну фази залежно від частоти (рисунок 4.7). Була

побудована також перехідна характеристика замкненої системи управління, яка демонструє, як система реагує на одиничний стрибок вхідного сигналу (рисунок 4.8).

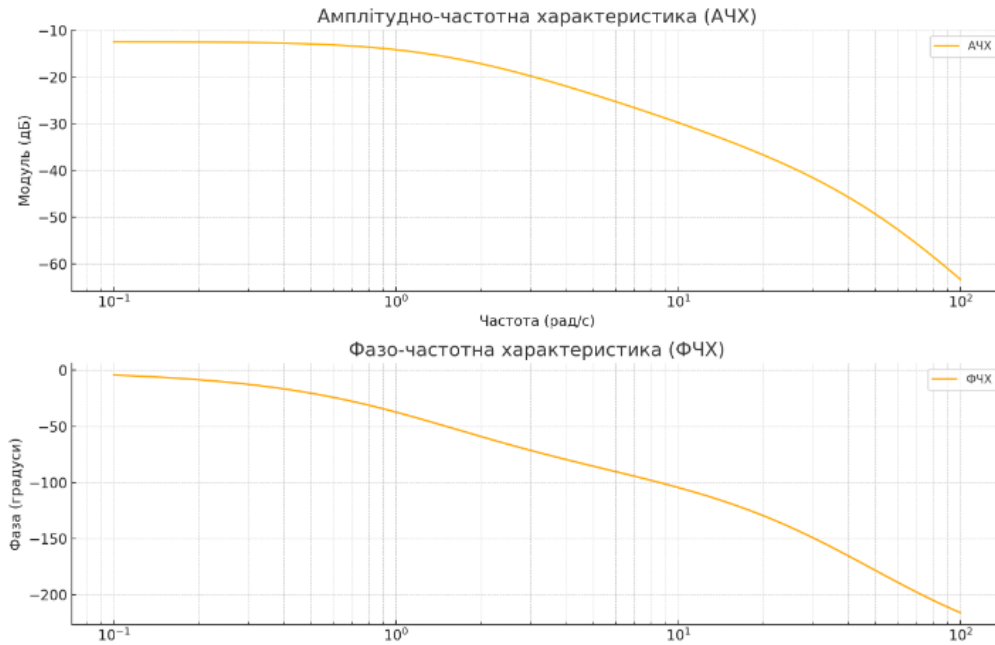


Рисунок 4.7 – Амплітудно-частотна характеристика та фазо-частотна характеристика замкненої системи управління

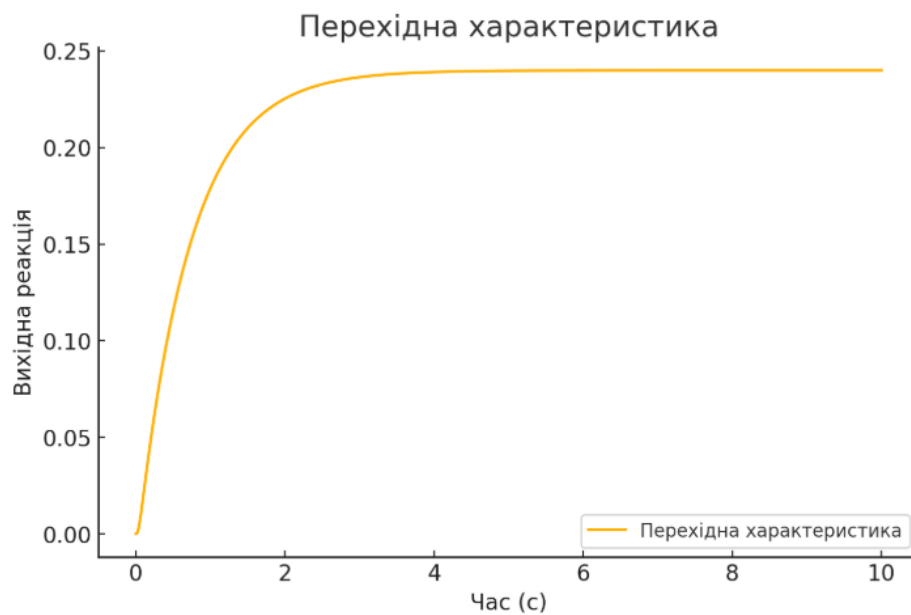


Рисунок 4.8 – Перехідна характеристика замкненої системи управління

Аналіз графіків показує, що система є стійкою і має достатню швидкодiю, проте спостерігається деяке перерегулювання, що може впливати на точність. Амплітудно-частотна характеристика свiдчить про помірний запас стійкості, а фазо-частотна – про наявність iнерційності без критичних фазових зсувів. Перехідний процес демонструє швидко досягнення усталеного стану з незначними коливаннями, що вказує на необхідність покращення демпфування для підвищення точності.

#### 4.4 Симуляція навантажень для 3D-моделі БПЛА

Симуляція навантажень є невід’ємною частиною iнженерного аналізу, адже вона дозволяє оцінити надійність конструкції ще на етапі моделювання. Для октокоптера особливо важливим є забезпечення міцності ключових елементів, таких як рама, кріплення двигунів і пропелерів, оскільки вони підлягають значним механічним навантаженням під час польоту. ПЗ Autodesk Fusion 360 ми провели симуляцію навантаження та вібрації на маніпулятори октокоптера, які обрали (рисунок 4.9)

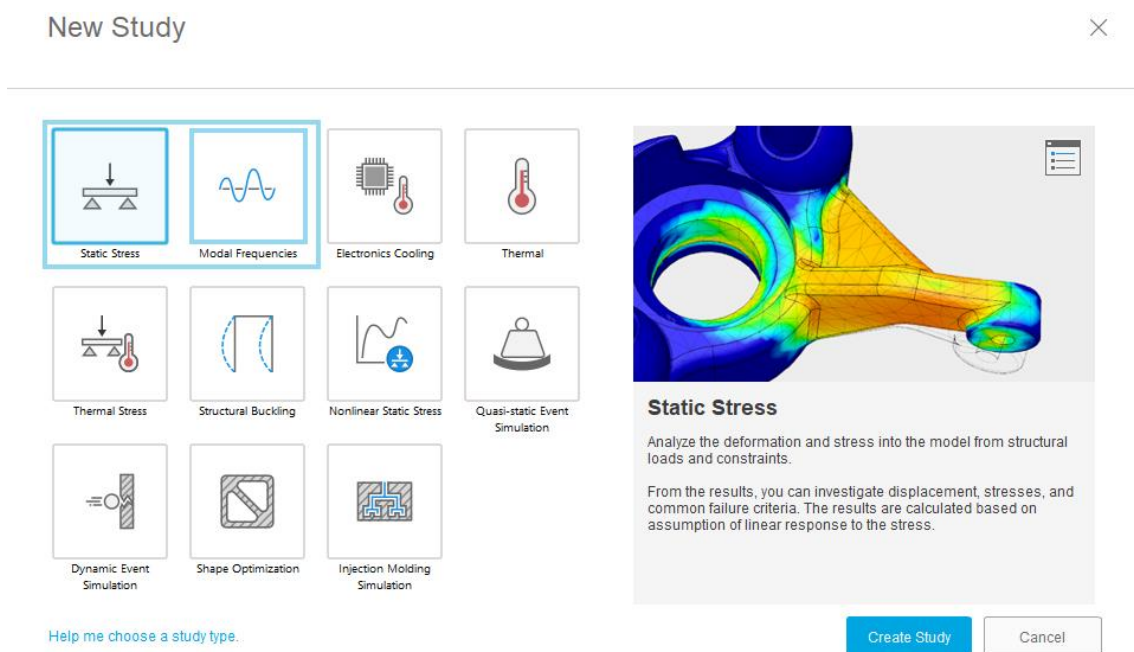


Рисунок 4.9 – Вікно симуляцій у ПЗ Autodesk Fusion 360

У процесі проектування октокоптера з діагоналлю 270 мм, виготовленого з карбонового волокна, було проведено симуляцію навантажень за допомогою програмного забезпечення Autodesk Fusion 360. Метою аналізу було визначення деформацій і напружень, що виникають у конструкції під час експлуатації, зокрема у критичних вузлах та елементах рами. Для моделювання враховано габарити рами та матеріал – карбонове волокно, яке характеризується високим модулем Юнга, низькою щільністю від  $1,5 \text{ г/см}^3$  до  $1,7 \text{ г/см}^3$  та високою міцністю на розтяг. Для карбонового волокна модуль Юнга зазвичай становить від 70 ГПа до 90 ГПа. На основі розробленої тривимірної моделі октокоптера було задано граничні умови, які відображають реальні експлуатаційні навантаження. У моделі враховано розподіл ваги між центральною платформою та променями рами, а також динамічні сили, що діють на кріплення двигунів. Зокрема, для симуляції було застосовано метод аналізу деформацій (Total Modal Displacement), який дозволяє оцінити зміщення елементів конструкції під дією прикладених сил (рисунк 4.10). Результати симуляції допомогли оцінити надійність конструкції та виявити потенційні критичні зони для подальшого вдосконалення.

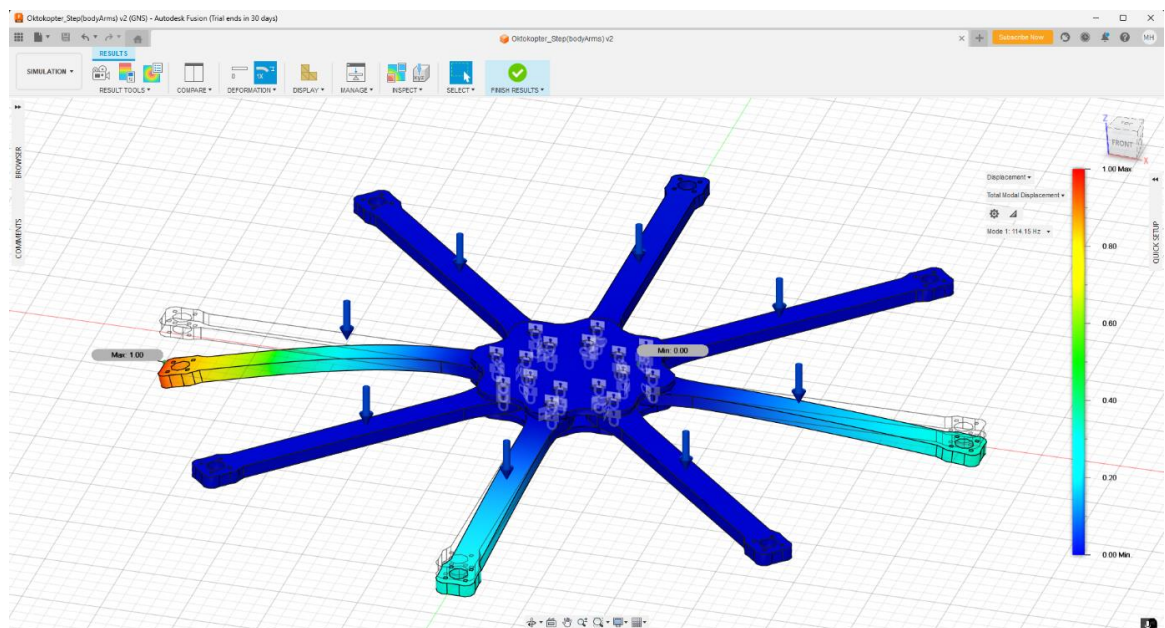


Рисунок 4.10 – Симуляція навантаження на маніпулятори октокоптера у ПЗ Autodesk Fusion 360

Результати симуляції вказали на максимальне зміщення маніпуляторів в діапазоні 1 мм, яке зосереджене в кінцевих ділянках променів. Кольорова шкала демонструє розподіл деформацій: червоні ділянки відповідають максимальному зміщенню, а сині – мінімальному. Частота першого модального режиму становила 114,15 Гц, що свідчить про достатню жорсткість конструкції для нормальних експлуатаційних умов (рисунок 4.11).

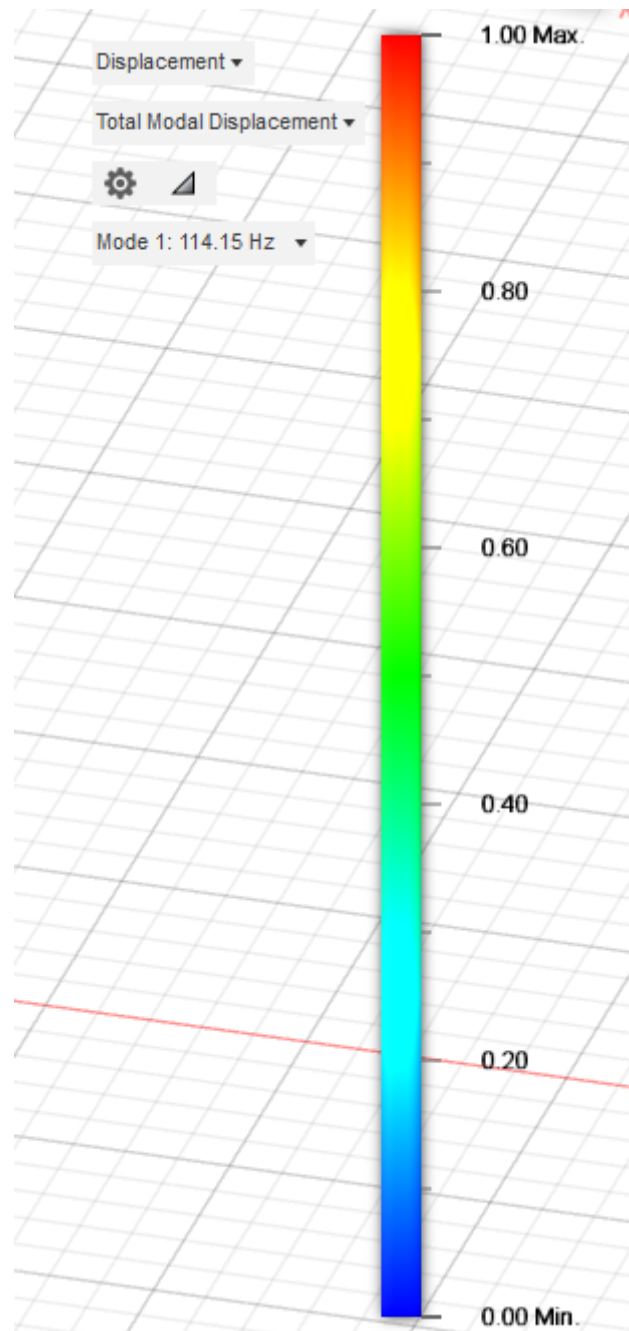


Рисунок 4.11 – Результат модального аналізу маніпулятора октокоптера в ПЗ Autodesk Fusion 360

Аналогічним способом була проведена симуляція вібрації октокоптера, яка теж показала задовільний результат (рисунки 4.12-4.13).

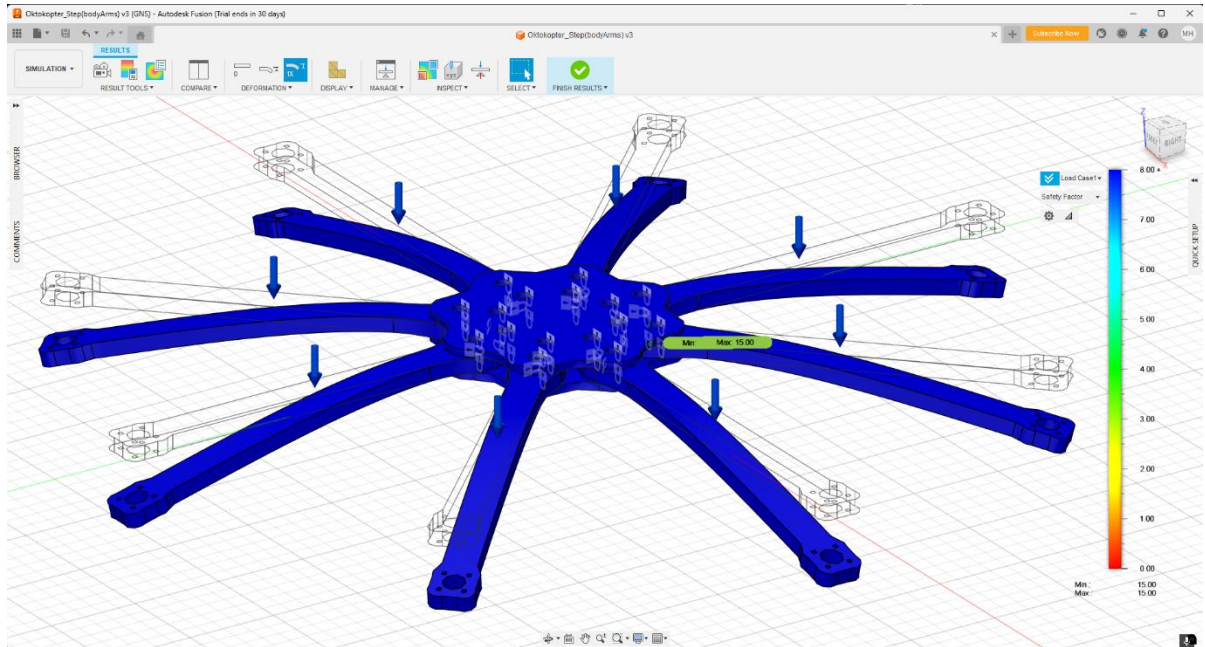


Рисунок 4.11 – Симуляція вібрації на маніпулятори октокоптера у ПЗ Autodesk Fusion 360

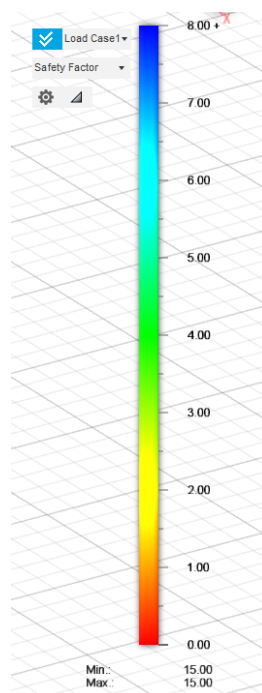


Рисунок 4.12 – Результат аналізу запасу міцності маніпулятора октокоптера у ПЗ Autodesk Fusion 360

Результати модального аналізу маніпулятора октокоптера показали, що максимальні переміщення спостерігаються у найбільш віддалених від опори частинах конструкції при першій частоті коливань 114,15 Гц. Це свідчить про те, що конструкція має достатню жорсткість.

Аналіз коефіцієнта запасу міцності продемонстрував, що конструкція має високий рівень надійності. Усі частини маніпулятора забезпечують значний запас міцності з максимальним значенням коефіцієнта, що дорівнює 15. Це свідчить про потенціал оптимізації ваги конструкції без ризику втрати її міцності.

Загалом конструкція маніпулятора є стійкою до зовнішніх впливів і придатною для експлуатації.

#### 4.5 Висновки до четвертого розділу

У цьому розділі було виконано етапи розроблення, спрямовані на аналіз і розрахунок параметрів системи автоматичного управління та тягово-рухової установки. Проведено моделювання частотних характеристик (ФЧХ і АЧХ) системи та симуляцію навантажень на конструктивні елементи БПЛА.

Амплітудно-частотна характеристика свідчить про помірний запас стійкості, а фазо-частотна – про наявність інерційності без критичних фазових зсувів.

Додатково було виконано симуляцію навантажень на маніпулятори октокоптера за допомогою ПЗ Autodesk Fusion 360. Це дозволило показати, що максимальні переміщення спостерігаються у найбільш віддалених від опори частинах конструкції при першій частоті коливань 114,15 Гц. Усі частини маніпулятора забезпечують значний запас міцності, з максимальним значенням коефіцієнта, що дорівнює 15. Це свідчить про потенціал оптимізації ваги конструкції без ризику втрати її міцності.

## ВИСНОВКИ

У ході написання кваліфікаційної роботи було виконано аналіз літературних джерел, присвячених класифікації БПЛА, а також аналіз технічного завдання: було з'ясовано, які повинні бути вимоги для конструкції БПЛА, його комплектації та які матеріали можуть бути застосовані під час розробки БПЛА для гуманітарної допомоги.

Також було виконано класифікацію безпілотних літальних апаратів за їх призначенням і технічними характеристиками. Розроблено структурну схему класифікації БПЛА за організаційними ознаками та складено таблицю з їх технічними параметрами.

Крім того, був проведений аналіз програмних забезпечень, таких як Autodesk Fusion 360, SolidWorks, Blender та САПІА. Вони мають достатній функціонал для розробки 3D-моделей, створення інженерної документації, симуляцій та візуалізації.

Обрано програмне забезпечення Autodesk Fusion 360 через його широкий функціонал, що включає 3D-моделювання, забезпечує комплексний підхід до проектування, спроможність створити моделі по ескізах та виконати симуляцію механічних, теплових та інших навантажень на модель, а також створювати анімацію процесів або роботи конструкції. Ця програма забезпечує інтеграцію різних етапів розробки в єдиній платформі, що спрощує процес створення та тестування моделей. Крім того, доступ до хмарного зберігання даних забезпечує можливість роботи з проєктами з будь-якої точки світу, що є особливо важливим в умовах сучасного дистанційного співробітництва.

У обраному програмному забезпеченні Autodesk Fusion 360 був розроблений БПЛА для виконання гуманітарних місій.

Проведено аналіз комплектуючих розробленого БПЛА для гуманітарної допомоги. А саме були обрані такі компоненти, як:

- мотор T-MOTOR 2207 1950KV, який був протестований на максимальній потужності та показав свою стійкість із різними видами гвинтів;
- акумулятор Tattu R-Line 6S 5000mAh 75C, який оптимально підходить для конструкції БПЛА та забезпечує стабільну роботу восьми двигунів;
- центральний процесор Betaflight F7, який здатний забезпечити належну обробку сигналів, ефективне управління потужними двигунами та стабільну роботу з великим акумулятором.

Також було побудовано функціональну схему САУ двигуна T-MOTORS 2207 1950kv, за якою були проведені розрахунки та побудовані графіки амплітудно-частотної характеристики, фазо-частотної характеристики та перехідна характеристика, яка демонструє, як система реагує на одиничний стрибок вхідного сигналу.

Була проведена симуляція вібрацій для оцінки роботи БПЛА у різних умовах, це дозволило показати реальні експлуатаційні навантаження, зокрема у критичних вузлах та елементах рами, та чітко дало зрозуміти, що критичних проблем не було виявлено і модель є стійкою до зовнішніх факторів.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.

3. Греков М. С. Безпілотна робототехнічна мобільна платформа для надання гуманітарної допомоги // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2024) [Електронний ресурс]: збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І. Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків: ХНУРЕ, 2024. – Вип. 2. – С. 157-163.

4. Класифікація дронів: які види та типи бувають [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bezpeka-shop.com/ua/blog/poleznye-sovety/klassifikatsiya-dronov-kakie-vidy-i-tipy-byvayut-chast-pervaya/>.

5. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту / Упоряд.: Д. В. Бондар, А. В. Гурник, А. О. Литовченко, В. В. Хижняк, В. Л. Шевченко, Д. М. Ядченко [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/1/0/7/9/0/0/2/ljQ2PLY10IvuTptkblpjCibdMBdVh3TutyE5LM9Z.pdf>.

6. DELAIR – Professional Drones and Sensors for Industry – Delair [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://delair.aero/](https://delair.aero/).
7. Zipline Logistics & Drone Delivery [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://www.flyzipline.com/](https://www.flyzipline.com/).
8. Швейцарська компанія SenseFly [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://traktorist.ua/brands/sensefly](https://traktorist.ua/brands/sensefly).
9. SZ DJI Technology [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://www.dji.com/global](https://www.dji.com/global).
10. SolidWorks [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://www.solidworks.com/](https://www.solidworks.com/)
11. Blender software [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://www.blender.org](https://www.blender.org).
12. CATIA software [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/catia/](https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/catia/).
13. Autodesk Fusion 360 Software [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription](https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription).
14. Дрони своїми руками [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://dronomania.ru/faq/dron-svoimi-rukami-urok-2-ramy.html?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F](https://dronomania.ru/faq/dron-svoimi-rukami-urok-2-ramy.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F).
15. Навчальний посібник «Безпека життєдіяльності» / Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк, І. І. Хондак ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків : ХНУРЕ, 2018. 336 с. – ISBN 978-966-659-246-3.
16. RCDrone [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://rcdrone.top/products/t-motor-p1604-fpv-motor-kv2850?currency=USD&variant=44004293771488&utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=Google%20Shopping&stkn=677f40c1dee9&gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQiAyois8BhDvARIsAO\\_CDsCPRz24nx\\_raiCLuGhXz\\_z5B\\_MelzWiau1mOZsPMce5C0l-JNIV4QIaAt20EALw\\_wcB](https://rcdrone.top/products/t-motor-p1604-fpv-motor-kv2850?currency=USD&variant=44004293771488&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Google%20Shopping&stkn=677f40c1dee9&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAyois8BhDvARIsAO_CDsCPRz24nx_raiCLuGhXz_z5B_MelzWiau1mOZsPMce5C0l-JNIV4QIaAt20EALw_wcB).

17. MiniQuad [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://www.miniquadtestbench.com/t-motor-f60-2207-2450kv.html](http://www.miniquadtestbench.com/t-motor-f60-2207-2450kv.html)
18. Молодий вчений [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://moluch.ru/archive/524/115884/](http://www/moluch.ru/archive/524/115884/)
19. Spard Battery Solution Expert [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://spardbatt.com/applications/uav-drone-battery/?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAiAnKi8BhB0EiwA58DA4cbwRFFta3Xo99-f3FpVrtU0ASEfjjNjXHeGutTfR-UENa0RnldxuxoC8ycQAvD\\_BwE#FPV-Drone-Series-battery](http://www/spardbatt.com/applications/uav-drone-battery/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAnKi8BhB0EiwA58DA4cbwRFFta3Xo99-f3FpVrtU0ASEfjjNjXHeGutTfR-UENa0RnldxuxoC8ycQAvD_BwE#FPV-Drone-Series-battery)
20. Betaflight [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: https://betaflight.com/docs/wiki/boards/archive/omnibusf4](http://www/betaflight.com/docs/wiki/boards/archive/omnibusf4)
21. Методичні вказівки з курсового проектування з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітня програма Системна інженерія [Електронне видання] / Упоряд.: Б. О. Малик, О. В. Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2017. – 48 с.
22. Дорф Р., Бішоп Р. Сучасні системи управління Пер. з англ. Б. І. Копилова.: Лабораторія базових знань, 2002. – 832 с.