

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
Факультет комп'ютерних наук
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

В. о. завідувача кафедри АКІТ,
кандидат технічних наук, доцент

_____ М. І. Сіделєв

“ ____ ” _____ 2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА НАУКОВА РОБОТА
на тему: «Система автоматизації керування квадрокоптера»

Пояснювальна записка

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

151 – МНР – 671.218371102

Студент _____ Тіхоміров К.А

Керівник _____ Щесюк О.В.

Консультант _____ Григор'єва Л.І.

Миколаїв – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет ім. Петра Могили
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення: Комп'ютерних наук
Кафедра, циклова комісія: Автоматизація та КІТ
Освітньо-кваліфікаційний рівень: рівень вищої освіти другий (магістр)

Напрямок підготовки 151 «Автоматизація та приладобудування»
(шифр і назва)

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри, голова циклової комісії

Сіделев М. І. _____
“ ___ ” _____ 2023 р

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ НАУКОВУ РОБОТУ

Тіхоміров Кирило Анатолійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи)

Система автоматизації керування квадрокоптера

керівник проекту (роботи) канд.техн.наук, доцент Щесюк Олег Володимирович,
затверджені наказом вищого навчального закладу від “ ___ ” _____ 2023 р. № ___

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 16.06.2023

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

Миколаївський обласний Центр науково-технічної творчості учнівської молоді

Об'єктом дослідження є квадрокоптер.

Предметом дослідження є автоматизована система керування квадрокоптера.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Розділ 1. Аналітичний огляд технічної інформації по БПЛА.

Розділ 2. Склад елементів БПЛА на прикладі квадрокоптера.

Розділ 3. Модель руху в просторі квадрокоптера.

Розділ 4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
 Схема пристрою квадрокоптера, Спрощена класифікація БПЛА, Структурна
 схема комплексу БПЛА, Кінематична схема квадрокоптера, Блокова схема,
 Графік перехідного процесу

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Щесюк О.В., доцент кафедри АКІТ	17.10.2022	
2	Щесюк О.В., доцент кафедри АКІТ	03.01.2023	
3	Щесюк О.В., доцент кафедри АКІТ	03.04.2023	
4	Григор'єва Л.І., професор кафедри екології	19.04. 2023	

7. Дата видачі завдання «17» жовтня 2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Затвердження пропозицій теми від керівника	20.09.2022	
2	Обговорення із студентом затвердженої теми	01.10.2022	
3	Формування завдання	17.10.2022	
4	Визначення актуальності, об'єкту, предмету	01.11.2022	
5	Пошук літератури, патентний пошук, уточнення задач дослідження	15.11.2022	
6	Виконання першої частини	01.12.2022	
7	Аналіз керівником записки першої частини (ЕВ*), формування зауважень та пропозицій	29.12.2022	
8	Опрацювання другої частини	01.03.2023	
9	Робота над третьою частиною	03.04. 2023	
10	Робота над розділом з охорони праці	19.05. 2023	
11	Передзахист	22.05. 2023	
12	Передача (ДВ) кваліфікаційної роботи	16.06. 2023	

*ЕВ – електронний варіант, ДВ – друкований варіант.

Студент _____ Тихоміров К.А.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ Щесюк О.В.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація. У роботі описано підхід до комп'ютерного моделювання безпілотного літального апарату (БПЛА) типу квадрокоптер шляхом інтеграції програмних пакетів SolidWorks та SimMechanics/MATLAB, промодельовано динамічну модель БПЛА типу квадрокоптер на основі методу візуально-орієнтованого програмування в середовищі SimMechanics, розроблений алгоритм управління квадрокоптером, що забезпечує об'єкту необхідну стабілізацію та можливість зависати на заданій висоті під впливом горизонтальних повітряних потоків.

Проведені дослідження підтверджують придатність зазначених підходів до дослідження динаміки польоту безпілотного літаючого апарату (квадрокоптера) з перспективою їх вдосконалення.

Магістерська робота складається з анотації, вступу, трьох розділів, спеціального розділу з охорони праці, висновків, списку використаних джерел з 32 найменувань. Загальна кількість сторінок – 87, таблиць – 2, рисунків – 42.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, квадрокоптер, математична модель, програмні пакети.

Abstract. The paper describes an approach to computer modeling of a quadcopter-type unmanned aerial vehicle (UAV) by integrating SolidWorks and SimMechanics/MATLAB software packages, a dynamic model of a quadcopter-type UAV is modeled based on the visual-oriented programming method in the SimMechanics environment, and a quadcopter control algorithm is developed, which provides the object with the necessary stabilization and the ability to hover at a given height under the influence of horizontal air currents.

The conducted studies confirm the suitability of the mentioned approaches for studying the flight dynamics of an unmanned aerial vehicle (quadcopter) with the prospect of their improvement.

The master's thesis consists of an abstract, an introduction, three sections, a special section on occupational health and safety, conclusions, a list of reference sources from 32 titles. The total number of pages is 87, 2 tables, 42 figures.

Keywords: unmanned aerial vehicle, quadrocopter, mathematical model, software packages.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПО БПЛА.....	11
1.1. Тенденції і перспективи розвитку БПЛА.....	11
1.2. Розвиток безпілотних літальних апаратів.....	12
1.3. Види і різновиди БПЛА.....	26
1.4. Спрощена класифікація БПЛА.....	32
1.5. Особливості управління квадрокоптера.....	34
1.6. Постановка задач дослідження.....	36
1.7. Висновки до розділу 1.....	36
2 СКЛАД ЕЛЕМЕНТІВ БПЛА НА ПРИКЛАДІ КВАДРОКОПТЕРА.....	37
2.1. Компоненти БПЛА.....	37
2.2. Принципи обробки інформації з датчиків квадрокоптера.....	42
2.3. Алгоритми логіки управління польотом БПЛА.....	49
2.4. Висновки до розділу 2.....	56
3 МОДЕЛЬ РУХУ В ПРОСТОРИ КВАДРОКОПТЕРА.....	57
3.1. Загальна інформація.....	57
3.2. Розробка моделі квадрокоптера в CAD-системі SolidWorks та трансляція моделі у Simscape Multibody.....	60
3.3. Рівняння руху квадрокоптера.....	62
3.4. Реалізація динамічної моделі БПЛА в Simscape Multibody/MATLAB.....	64
3.5. Результати моделювання.....	69
3.6. Висновки до розділу.....	72
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	73
4.1. Загальний опис приміщення та аналіз умов праці в ньому.....	73
4.2. Система протипожежного захисту.....	78
4.3. Цивільний захист.....	79
4.4. Висновки до розділу 4.....	81
ВИСНОВКИ.....	82
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ, ПОСИЛАННЯ.....	84

ВСТУП

Розвиток безпілотних літаючих апаратів був спричинений потребою в легких, економічних пристроях, які мають високу мобільність та можуть виконувати широкий спектр завдань. Ці апарати успішно використовуються у різних сферах діяльності людини.

Безпілотний літаючий апарат (БПЛА) – це літальний апарат, який може бути пілотований віддалено або виконувати автономний політ без участі пілота. Інші назви для цього пристрою можуть бути «безпілотник» або «дрон» (від англійського слова Drone, що означає трутень).

Квадрокоптери були одними з перших вертольотів, які відірвалися від землі та змогли здійснювати польоти. Георгій Ботезату створив перший квадрокоптер і успішно випробував його в 1922 році. Однак, ці апарати мали свої недоліки, зокрема, громіздку трансмісію, що передавала обертання одного мотора на кілька гвинтів. Виникнення хвостового гвинта та автомата перекошу дозволило подолати ці труднощі, хоча нові розробки квадрокоптерів з'явилися у 1950-х роках, розвиток цієї технології довгий час стояв на місці після тестових зразків.

Зараз доступно широке розмаїття безпілотних літальних апаратів, які можуть бути забезпечені або безмоторними, такими як планери та повітряні змії, або ж моторними, серед яких найбільш популярними є квадрокоптери.

Мультикоптер – це безпілотний літальний апарат, що складається з чотирьох несучих гвинтів, які діагонально обертаються в протилежних напрямках. Цей тип апаратів, які називають мультикоптерами, може мати будь-яку кількість несучих гвинтів. Вперше мультикоптери розпочали свій розвиток на початку історії вертольотобудування, проте подальший розвиток був ускладнений складністю конструкції передачі обертання одного двигуна на всі гвинти і необхідністю винаходу апарату перекошу для класичних вертольотів. Важливий прорив у розвитку мультикоптерів відбувся у XXI столітті, коли ці літаючі апарати стали безпілотними. Мультикоптери мають

просту конструкцію, тому вони широко використовуються в аматорському моделюванні. Вони можуть бути оснащені камерами та GPS-приймачами, що дозволяє здійснювати якісну зйомку місцевості з висоти та автономно прокладати маршрути. Мультикоптери мають маленький розмір, легкі, дуже маневрені, відносно дешеві і прості у використанні. Ці якості дають можливість використовувати ці літальні апарати в рятувальній службі, дослідницьких роботах, доставці дрібногабаритних вантажів і т.і.

Однак, головна проблема мультикоптерів полягає в низькій тривалості польоту через малу ємність батареї. Багато мультикоптерів мають безколекторні електродвигуни, які витрачають енергію швидко. Ця проблема зменшує можливість широкого застосування мультикоптерів у різних галузях, оскільки середній час польоту на одній зарядці батареї складає близько 20 хвилин, що є недостатньою тривалістю польоту.

Актуальність роботи. В наш час розробка безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різних типів та функціональних можливостей є надзвичайно актуальною та перспективною темою, що приваблює молоді конструкторські колективи своєю інноваційністю та великим попитом на ринку. Цивільні БПЛА використовуються для різноманітних завдань, таких як аерофотозйомка, патрулювання, інспекції, доставка вантажів, забезпечення зв'язку та контроль повітряного простору.

У БПЛА існує стандартна морфологія системи автоматичного керування, однак архітектура керуючої системи може змінюватись в залежності від призначення конкретного літального апарату. Для досягнення максимальної ефективності та успішності виконання завдань, система керування БПЛА повинна включати автоматичний зліт та посадку, програмне керування, стабілізацію положення в просторі, високу маневреність, бистродію та точність руху по траєкторіям, а також планування маршруту з уникненням перешкод.

Однак, неповна комплектація та недостатня відповідність вимогам

БПЛА можуть позначатись на його точності та стабільності польоту, що зменшує ефективність виконання завдань. Тому дослідження в напрямку покращення керування безпілотними літаючими апаратами та підвищення точності їх польоту є надзвичайно актуальними та мають важливе практичне значення.

Метою даної роботи є досягнення більш ефективного керування безпілотним літаючим апаратом, щоб забезпечити більш точне переміщення за визначеним маршрутом та збільшити стабільність польоту. Для цього в проєкті були поставлені наступні завдання:

- проведення огляду предметної області та аналізу існуючих рішень;
- розроблення функціональної схеми системи керування квадрокоптером;
- проєктування моделі в середовищі Simulink/MATLAB, яка дозволяє проводити оцінку системи стабілізації і системи управління літальним апаратом для квадрокоптера, виконаного за аеродинамічною схемою «квадрокоптер» без запуску самого квадрокоптера;
- аналіз показників стійкості та якості змодельованої системи керування квадрокоптером.

Об'єктом дослідження є системи керування безпілотними літаючими апаратами.

Предметом дослідження є моделі, методи та засоби удосконалення автоматизованої системи керування квадрокоптером.

Методи дослідження. У даній роботі для вирішення поставлених завдань були використані різні методи дослідження, математичний аналіз та моделювання. Для математичних розрахунків був використаний пакет прикладних програм MATLAB, а для моделювання систем – графічне середовище MATLAB/Simulink.

Наукова новизна одержаних результатів. Було досягнуто кілька нових наукових результатів: проведений аналіз властивостей квадрокоптера; під час керування квадрокоптером, слід враховувати характеристики та

параметри, що впливають на точність його руху та здатність до точного позиціонування. Також слід враховувати широкий спектр питань, які необхідно враховувати при розробці системи керування безпілотним літальним апаратом, а саме спроектована модель в середовищі Simulink/MATLAB, яка дозволяє проводити оцінку системи стабілізації і системи управління літальним апаратом для квадрокоптера, виконаного за аеродинамічною схемою «квадрокоптер» без запуску самого квадрокоптера.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- запропонована система керування безпілотним літаючим апаратом забезпечує підвищення ефективності керування БПЛА та його стабілізації в повітрі;
- спроектована модель в середовищі Simulink/MATLAB, яка дозволяє проводити оцінку системи стабілізації і системи управління літальним апаратом для квадрокоптера, виконаного за аеродинамічною схемою «квадрокоптер» без запуску самого квадрокоптера.

Магістерська робота складається з анотації, вступу, трьох розділів, спеціального розділу з охорони праці, висновків, переліку джерел посилання з 32 найменувань. Загальна кількість сторінок – 87, таблиць – 2, рисунків – 42.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПО БПЛА

1.1. Тенденції і перспективи розвитку БПЛА

Спеціальні мобільні роботи є одними з найпоширеніших видів робіт, які здатні без проблем переміщатися та адаптуватися до навколишнього середовища. Проте, для цього роботи потребують інформації про своє оточення та відповідного планування своєї траєкторії. Цей процес називається плануванням траєкторії, яке має найважливіший результат – автономність руху мобільного робота. Автономність дозволяє роботам вирішувати численні проблеми, пов'язані з напівавтоматичним управлінням, зменшуючи людські помилки та звільняючи оператора. На даний момент, існує декілька методів планування траєкторії, зокрема планування з використанням енкодерів, інерційних датчиків, пристроїв технічного зору, а також методів зміни траєкторії з використанням GPS або ГЛОНАСС. Вибір підходу залежить від типу робота та мети його руху.

Ці підходи були успішно використані для планування траєкторії руху робіт, але можливість використання кожного з них залежить від типу робота та мети руху.

Наприклад, при плануванні траєкторії безпілотних літальних апаратів (БПЛА) використовуються всі ці методи залежно від мети польоту, рівня автономності та стану навколишнього середовища [1]. Однак, за аналізом літератури, відсутня чітка схема співвідношення між БПЛА та обраною метою польоту, що призводить до виникнення безлічі підкласів БПЛА з різними рівнями автономності, аеродинамічними параметрами та керованістю.

Проблема систематизації БПЛА як різновиду літальних апаратів змінювалась разом з розвитком технологій. Існують різні підходи до класифікації БПЛА, такі як за функціональністю та системністю.

За першим визначенням, БПЛА є літальним апаратом, який виконує польоти без участі пілота, або пілотується віддалено [2]. Друге визначення вказує на те, що БПЛА може бути частиною безпілотних авіакомплексів (БАС), які складаються з БПЛА, наземного пункту дистанційного управління, постачальників технічної підтримки, і каналів зв'язку з користувачами [3]. При цьому, БПЛА поділяються на чотири основні групи: БАС з дистанційно-пілотованим літальним апаратом, БАС з безпілотним автоматичним літальним апаратом, БАС з дистанційно-керованим літальним апаратом і БАС з літальним апаратом, що керується авіаційною системою здалеку.

З точки зору мехатроніки і робототехніки, БПЛА можна визначити як спеціальні роботи, які відносяться до класу літаючих апаратів без пілота, включаючи ті, що здійснюють політ заздалегідь заданої траєкторії на землі і не можуть бути змінені під час їх виконання оператором. Таке визначення дозволяє краще зрозуміти мету планування траєкторії та управління польотом.

1.2. Розвиток безпілотних літальних апаратів

Мрія людства про політ належить до найдавніших, і перший успішний політ відбувся в 1903 році. З тих пір авіаційні технології неперервно розвиваються. Людина перевірила безліч конструкцій, перш ніж виявити оптимальні підйомні системи. За кілька десятиліть людина змогла літати на звукових і надзвукових швидкостях та розробити великі літаки з несучими крилами. Завдяки швидкому розвитку технологій в авіаційній галузі, утворився широкий та прибутковий ринок.

Літаки класифікуються на групи, які називаються «поколіннями». Літаки одного покоління мають подібні конструктивні, аеродинамічні та апаратні можливості. Покращені покоління літаків (четверте та наступні) вимагають,

щоб літак був простим у керуванні, здатним до самостійного прийняття рішень та відстеження траєкторій.

На сьогоднішній день F-22 Raptor (США) та Сухий ПАКФА – Т50 є єдиними літаками п'ятого покоління [4], і вимоги до цього покоління не можуть бути досягнуті без застосування складних мехатронних та робототехнічних систем.

Ці вимоги включають в себе використання легких вуглецевих матеріалів в конструкції літаків, використання мікро- та наноелектромеханічних систем на борту літака, можливість регулювати тягу двигунів за різними кутами атаки, планування мети польоту та створення траєкторії, а також високопродуктивні системи управління станом польоту.

З точки зору мехатроніки та робототехніки, розв'язання задач автоматичного керування станами польоту та планування мети польоту є об'єктом наукових досліджень, і ці завдання можуть бути вирішені за допомогою автономних систем польоту.

Історично, автономність польоту була досягнута в космічній та військовій галузях. Наприклад, німецьку ракету V-4 називають першим «автономним» літальним апаратом. Протягом років поняття автономності польоту еволюціонувало. На сьогодні автономність поділяється на часткову (коли літальний апарат керується дистанційно) та повну (коли він керується самостійно). Створення нового класу літальних апаратів, які не потребують пілота, призвело до виникнення безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

БПЛА – це особливі повітряні роботи, які переважно використовуються в військових цілях. Зацікавленість конструкторів літальних апаратів до БПЛА зростає, оскільки замовлення на цивільний ринок представляють більш масові та прибуткові можливості.

Технологія створення БПЛА була розроблена ще в 1849 році, коли австрійські війська використовували повітряні кулі для переправки бомб до обложеної Венеції.

Інновації в галузях телекомунікацій та зв'язку дозволили значно підвищити рівень автономності та покращити керованість БПЛА. Одним з ключових кроків була поява радіотелеграфу, що дозволило ввести радіокерування повітряними апаратами. У 1898 році Тесла створив мініатюрне радіокероване судно, а Чарльз Кеттерінг випробував різноманітні моделі БПЛА вже в 1910 році. У 1933 році у Великобританії був розроблений перший багаторазовий БПЛА.

В СРСР розробки в галузі БПЛА з'явилися в 1930-1940 роках. Була створена концепція торпедоносця-планера на основі «літаючого крила». Після закінчення Другої світової війни зростає зацікавленість БПЛА, і починаючи з 1960-х років вони вже успішно використовувалися для мирних цілей.

Можна умовно розділити історію розвитку БПЛА на чотири етапи, що відображають основні моменти їх становлення:

1. Від 1849 року до початку ХХ століття – проведення експериментів з створення БПЛА, розробка основ аеродинаміки, теорії управління польотом та обчислення аеродинамічних, літальних і конструктивних коефіцієнтів БПЛА.
2. Від початку ХХ століття до 1945 року – розробка військових БПЛА.
3. 1945-1960 роки – встановлення класифікації БПЛА за їхнім застосуванням.
4. Від 1960 років до наших днів – розширення класифікації БПЛА та початок їх використання для цивільних цілей.

На протязі історії було випробувано різні види літальних апаратів, проте для створення БПЛА були відібрані найкращі конструкції. На сьогоднішній день існує два основних типи БПЛА: модель зі стаціонарним крилом та модель гвинтокрилого типу. Ідея створення гвинтокрилого літального апарату належить Леонардо да Вінчі, та з моменту його створення, ці апарати літають за рахунок підйомної сили, яку створюють один або декілька несучих гвинтів, оскільки вони важчі за повітря.

Разом з проведенням наукових досліджень у галузі матеріалів та використанням мікро- та наноелектромеханічних систем у багатьох пристроях, розміри та вага літальних апаратів значно зменшилися. Сьогодні ми маємо доступ до мініатюрного літального апарату (МЛА), створення якого коштує менше 70 доларів. Квадрокоптери належать до цього класу МЛА. Крім того, розроблено додаткові класи безпілотних літальних апаратів.

Мікро- та міні-БПЛА є класом дуже легких і компактних апаратів зі злітною масою до 5 кг та дальністю польоту до 25-40 км, що переважно використовується для здійснення спостережень. Зокрема, до цього класу належать такі моделі, як ZALA 421-11, ZALA 421-08, ZALA 421-12, T23 «Елерон», T25, «Елерон-3», «Гамаюн-3», «Іркут-2М» та інші.

Легкі БПЛА мають менший радіус дії та вагу, що знаходиться в межах від 5 до 50 кг. Дальність їх польоту зазвичай становить від 10 до 120 км. До цього класу належать такі БПЛА, як «Гамаюн-10», «Іркут-10», T92 «Лотос», T90 (T90-11) та інші.

Середні БПЛА мають злітну масу від 100 до 300 кг та дальність польоту від 150 до 1000 км. У цей клас входять БПЛА, такі як E22M «Берта», «Беркут» та «Бджола-1Т».

Таким чином, завдяки науковим дослідженням та використанню новітніх технологій, сьогодні ми маємо доступ до різних класів легких та компактних БПЛА.

Важкі БПЛА середнього радіусу дії відносяться до категорії з масою понад 500 кг та дальністю польоту від 70 до 300 км. До цієї категорії можна віднести Ту-243 «Рейс-Д», Ту-300, «Іркут-850», «Нарт» (А-03).

У Важких БПЛА великої тривалості польоту, такі як Predator, Reaper, Global Hawk (виробництва США) та Heron (виробництва Ізраїлю), є свої переваги та недоліки.

У свою чергу, *квадрокоптер* - це тип літального апарата, який має чотири ротори, які обертаються діагонально в протилежних напрямках. У порівнянні з важкими БПЛА великої тривалості польоту, він має свої

переваги та недоліки, і складається з безлічі модулів, таких як ротори, блоки живлення та управління, акселерометри та гіроскопи. Сьогодні застосовуються компоненти на базі мікроелектромеханічних систем для зменшення габаритів та маси. Кристали мікросхем МЕМС мають розмір від 20 мкм до 1 мм, а мікромеханічні пристрої – від 1 до 100 мкм, що дозволяє їх використовувати в мініатюрних літальних апаратах.

Маса пристрою є важливою складовою при проектуванні літальних апаратів, оскільки вона включається у співвідношення загальної маси літального апарату до результуючої сили підйому, що безпосередньо впливає на аеродинамічні характеристики літального апарату.

Квадрокоптер має перевагу в маневреності, яка полягає в здатності змінювати напрямок польоту без необхідності виконання додаткових обертів. Квадрокоптер не потребує механічних з'єднань для зміни кута нахилу лопатей ротора під час обертання.

Одна з ключових характеристик квадрокоптера – це крок гвинта, тобто відстань, яку гвинт проходить за один повний оберт (360°) в повітрі. Більший крок гвинта означає, що лопаті захоплюють більше повітря, що призводить до більшого навантаження на двигун і меншої швидкості обертання гвинта (оборотів). Це спрощує конструкцію і скорочує час на обслуговування, але одночасно знижує швидкість польоту.

Ще одна перевага квадрокоптера – використання чотирьох роторів. Така особливість дозволяє зменшувати діаметр лопатей МЛА, і тоді виходить сума діаметрів роторів (їх чотири) менше, ніж діаметр еквівалентного ротора для даного розміру літаючого апарату. Завдяки цьому довше зберігається кінетична енергія під час польоту і зменшується ймовірність виявлення квадрокоптера, а також збільшується дальність його польоту. Це пояснюється тим, що чим більше втрати кінетичної енергії, тим вище температура (тепло) на роторах, через що з'являється можливість виявити МЛА за допомогою детекторів теплоти. Відмова від застосування автомата перекошу призводить до спрощення конструкції і здешевлення кінцевої

вартості апарату. Причина цього полягає в особливості використання функціональних можливостей автомата перекосу. У вертольотах він забезпечує управління вертикальним пересуванням гвинтокрилого літального апарату, а також його нахилом по крену і тангажу. Щоб домогтися цього результату автомат періодично змінює напрямок установки кожної лопаті гвинта в залежності від того, де лопать знаходиться в певний момент часу в ході обертання гвинта як цілого. Існують кілька недоліків у конструкції квадрокоптера, найважливішим з яких є відсутність допоміжних механізмів для стабілізації польоту. Особливо це стає помітним при розгляді нелінійності динамічної моделі квадрокоптера. Додатково, квадрокоптер має обмежену дальність польоту та вантажопідйомність. З урахуванням цих факторів, можна стверджувати, що квадрокоптер – це високоманеврений, але нестабільний літальний апарат, тому дослідження управління ним – це важлива технічна задача. Крім того, для використання квадрокоптера як БПЛА необхідно вирішувати питання планування траєкторій польоту.

За останній час спостерігається швидкий ріст кількості моделей дронів та їх різновидів, що обумовлено їх різноманітним призначенням та використанням у безпілотних літальних апаратах (БПЛА). На порталі Geeksus був опублікований рейтинг кращих моделей квадрокоптерів з камерою за 2022 рік [15]. У цей список увійшли наступні моделі:

- Parrot Bebop Drone 2;
- Xiro XPLOER V;
- Autel Robotics X-Star Premium;
- Xiaomi Mi Drone 4K;
- YUNEEC Typhoon Q500 4K;
- DJI Phantom 3 SE;
- DJI Spark;
- DJI Mavic Air;
- DJI Mavic Pro;
- YUNEEC Typhoon H.

Далі коротко описані головні особливості кожного дрону, їх плюси та мінуси, після чого сформовано порівняльну характеристику всіх моделей у вигляді таблиці (таблиця 1.1), кожний пункт порівняння оцінювався кількістю балів від 1 до 10.

1. *Parrot Bebop Drone 2*

Дрон від французької компанії Parrot SA є легким апаратом вагою 500 грамів, який може керуватися за допомогою смартфона і має вбудовану камеру. Потужні двигуни забезпечують швидкість до 65 км/год і високу маневреність. Дальність зв'язку становить 100 метрів, але може бути збільшена до 2 кілометрів за допомогою додаткової апаратури. Батарея ємністю 2700 мА·год дозволяє провести до 25 хвилин у повітрі. Одна з унікальних особливостей цього дрона полягає в його здатності виконувати акробатичні маневри. Оптичний стабілізатор відсутній, але зображення стабілізується програмно. Відеозйомка здійснюється в роздільній здатності 1080p/30 на внутрішню пам'ять обсягом 8 ГБ. Якість зображення вважається середньою, з недостатньою різкістю, і матриця шумить при слабкому освітленні. [16].

Автоматичні режими: зліт і посадка; повернення на місце; чотири види зйомки; політ по точках (за додаткову плату).

Переваги: компактний розмір, високу швидкість та маневреність, а також наявність різноманітних режимів польоту і стійкість до пошкоджень.

Недоліки: обмежена внутрішня пам'ять у розмірі 8 ГБ без підтримки SD-карт, висока ціна для іграшкового дрона, наявність платних доповнень та середньої якості зйомка в форматі FHD без оптичної стабілізації.

2. *Xiro XPLOER V*

Дрон від компанії Shenzhen Zero UAV має вагу 1,3 кг і обладнаний батареєю ємністю 5200 мА·год, що забезпечує до 25 хвилин польоту на відстань, не перевищуючи 200 метрів. Проте варто зазначити, що літальний апарат повільно реагує на команди і не підтримує різкі повороти. В комплекті йде

камера з 14-мегапіксельною матрицею Panasonic, яка кріпиться на трьохосяховий підвіс. Відеоролики записуються з роздільною здатністю 1080p/30 без різких зрушень. Користувач має можливість налаштування експозиції, ISO і балансу білого (за допомогою пресетів) з мобільного пристрою, а файли зберігаються на карту пам'яті.

Переваги: незвичайний дизайн, гарну комплектацію з можливістю оновлення, стабілізовану камеру з матрицею Panasonic та відносно низьку ціну за наявні функціональні можливості.

Недоліки: нестабільний бездротовий зв'язок між пультом і смартфоном, обмежена дальність і висота польоту, можливість закріплення лише великого смартфона на пульті та можливість виникнення помилок у програмному забезпеченні.

3. Autel Robotics X-Star Premium

Яскравий дрон від американської команди Autel Robotics має великий монолітний корпус вагою 1,6 кг і оснащений батареєю ємністю 4900 мА·год, що забезпечує приблизно 20 хвилин польоту на відстань до 2 км. Швидкість цього дрона середня і становить до 56 км/год. Апаратура має ЖК-екран, на якому відображаються ключові дані, а також є можливість закріплення мобільного пристрою діагоналю до 10 дюймів. Камера Sony з 12-мегапіксельною матрицею кріпиться на карданному підвісі і має ширококутний об'єктив з кутом огляду 108 градусів. Вона здатна знімати відео з роздільною здатністю 4K/30 без зміщень, а експозицію та витримку можна налаштувати прямо з пульта. [18].

Автоматичні режими: зліт і посадка; обліт точки; відвідування геопозиції; політ за пультом.

Переваги: міцний та яскравий корпус дизайну, стабільну зйомку відео в роздільній здатності 4K з можливістю ручних налаштувань, а також непогані показники часу польоту та дальності за одну батарею.

Недоліки: відсутність датчиків перешкод, комплектація лише однією батареєю та ризики щодо підтримки, оскільки офіційно він не постачається в Україну.

4. *Xiaomi Mi Drone 4K*

Дрон відомої компанії Xiaomi має середні розміри корпусу і вагу 1,4 кг. Він оснащений великою батареєю ємністю 5100 мА·год, що забезпечує до 27 хвилин польоту на відстань до 2 км зі швидкістю до 57 км/год. Для використання в ролі монітора використовується смартфон, який кріпиться до пульта керування. Камера дрона розташована на трьохосьовому підвісі з вібропоглинаючими опорами і має сферичну форму. Матрицею камери є Sony з роздільною здатністю 12,4 МП, а також є slot для SD-карти. Об'єктив дрона розкривається на 104 градуси, а відео стабілізоване на рівні 4K/30, з можливістю сповільненої зйомки 1080p/100. [19].

Переваги: стабільні відео високої якості, наявність ширококутного об'єктива з компенсацією дисторсії, а також гарну автономність і дальність польоту.

Недоліки: обмежена кількість налаштувань для фотографій та відео, незручний зв'язок між пультом керування та мобільним пристроєм, а також погана якість фотографій у темряві через шум на матриці.

5. *YUNEEC Typhoon Q500 4K*

Дрон від китайських авіабудівників Yuneec International має відносно велику вагу 1,7 кг, що призводить до невисокої швидкості до 37 км/год і обмеженої дальності польоту до 400 метрів. Велика батарея ємністю 5400 мА·год забезпечує до 25 хвилин польоту. Дрон оснащений ширококутним об'єктивом (115 градусів), який виправляє дисторсію, а трьохосьовий підвіс забезпечує стабільні відео. Матриця камери має роздільну здатність 12 МП і здатна знімати відео в роздільній здатності 4K/30, а також підтримує уповільнену зйомку 1080/120. З пульта керування можна встановлювати ключові параметри для зйомки, але матриця не підтримує ISO більше 600, що

може призводити до появи шумів на зображенні. Унікальною особливістю цього дрона є функція "Watch Me", за якої камера завжди спрямована на оператора. [20].

Автоматичні режими: зліт і посадка; збереження відстані до оператора; політ за пультом.

Переваги: шикарну комплектацію і готовність до польоту, привабливий зовнішній вигляд, стабільне відео в роздільній здатності 4K/30 і наявність уповільненої зйомки 1080/120.

Недоліки: відсутність сенсорів ближньої дії, низька швидкість і дальність польоту, а також те, що матриця камери не призначена для нічної зйомки.

6. DJI Phantom 3 SE

Оновлений дрон від компанії DJI є середнього розміру і має вагу 1,2 кг. Акумулятор ємністю 4480 мА·год дозволяє літати до 25 хвилин на відстані до 3,6 км зі швидкістю до 60 км/год. Дрон оснащений сферичною камерою на трьохосьовому підвісі з об'єктивом, який має кут огляду 94 градуси. Матриця камери має роздільну здатність 12 МП і дозволяє знімати відео в роздільній здатності 4K/30. Проте дрон не має особливих режимів або спецефектів і якість зображень залежить від освітлення. [21].

Автоматичні режими: зліт і посадка; обліт точки; політ за пультом; політ по точках.

Переваги: висока дальність і час польоту, зйомку відео в роздільній здатності 4K і стабілізований по всіх осях підвіс.

Недоліки: необхідність зміни прошивки для відкриття режиму FCC, використання дешевого пластику в конструкції і відсутність парктроників, що підвищує ризик зіткнення з перешкодами.

7. DJI Spark

Малогабаритний дрон компанії DJI, вагою 300 г, має акумулятор ємністю 1480 мА·год, що забезпечує час польоту від 12 до 16 хвилин. Реальна дальність польоту в міському середовищі становить близько 30 метрів, а на відкритій місцевості до 100 метрів. Швидкість дрона досягає 25 км/год. Управління здійснюється за допомогою смартфона через Wi-Fi, оскільки базова комплектація не містить пульта керування.

Дрон оснащений об'єктивом з кутом огляду 82 градуси, який не спотворює зображення. Подвійна стабілізація забезпечує стабільність по горизонталі, хоча повороти можуть бути менш плавними. Добрі кадри можна отримати лише за яскравого освітлення, а результати зйомки зберігаються на SD-карті. [22].

Переваги: малі габарити; легко перевозити в штатному боксі; камера з механічною стабілізацією по двох осях; спеціальні автоматичні ефекти для відео.

Недоліки: мала дальність, час і швидкість польоту; розширення відео обмежена Full HD; немає стабілізації камери по третій осі.

8. *DJI Mavic Air*

Дрон компанії DJI, який був визнаний одним з найкращих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) 2018 року, має малу вагу 430 грамів. Акумулятор ємністю 2375 мА·год дозволяє тримати дрон у повітрі до 17 хвилин. Стандартна швидкість дрону становить 28,8 км/год, але можливе розгон до 68,4 км/год. Радіоканал обмежує дальність до 1,7 км, а в міському середовищі - до 750 метрів. Для керування використовується пульт, до якого кріпиться смартфон.

Цей дрон, подібно до моделі DJI Spark, розпізнає жести і може ухилятися від статичних перешкод завдяки вбудованим сонарам. Він оснащений стандартною камерою 12 Мп з об'єктивом, що має кут огляду 85 градусів і трьохосевою стабілізацією. Зйомка відео доступна у форматі 4K/30,

а також є можливість зберігання власної пам'яті (8 ГБ) та використання SD-карти.

Серед автоматичних режимів цього дрона: зліт і посадка, кругові і спіральні обльоти, а також режим "Астероїд", який створює сферичну панораму з ключовим об'єктом в центрі.

Переваги: легкий корпус зі складними пілонами; камера знімає відео з роздільною здатністю до 4K/30; автоматичні режими для зйомки яскравих відео.

Недоліки: дальність польоту обмежена каналом Wi-Fi; невисока якість статичних фото; помилки при склеюванні панорам.

9. DJI Mavic Pro

Остання модель дрона компанії DJI, яка увійшла до списку, має вагу 734 грами. Вона оснащена батареєю ємністю на 1А·год, що дозволяє досягти високих показників польоту - до 27 хвилин. Максимальна швидкість цього дрона становить 65 км/год, а підтверджена дальність досягає 3,5 км. Пульст керування має вбудований ЖК-екран і роз'єми для підключення смартфона.

Камера цього дрона має об'єктив з кутом огляду 78 градусів, стандартна матриця 12 Мп і забезпечена стабілізаторами по всіх осях. Відеозапис виконується в форматі 4K/30 або 1280p/120 у режимі сповільнення. Проте, фотографії виходять якісні лише при хорошому освітленні.

Серед автоматичних режимів цього дрона: зліт і посадка, а також спостереження за об'єктом в кадрі.

Переваги: складаний апарат займає мало місця при перевезенні; універсальне управління з пульта, смартфона або комбіноване; відео в режимі до 4K / 30 з механічною стабілізацією.

Недоліки: відсутні бічні сонари і сенсори задньої півсфери; немає ефектів для автоматичної зйомки; короткі посадочні опори вимагають рівного майданчика.

10. YUNEEC Typhoon H

Дрон від китайської компанії Yuneec International, який ви згадуєте, має батарею ємністю 5400 мА·год, що забезпечує 25 хвилин польоту. Він може летіти на відстань до 2,5 км зі швидкістю до 70 км/год [18].

Пульт керування в цьому дроні має вбудований 7-дюймовий планшет, на якому можна відображати зображення та телеметрію, а також виводити їх на телевізор. Існує також можливість парного управління, де пілот керує апаратом, а оператор - об'єктивом.

Об'єктив цього дрона має кут огляду 115 градусів і може обертатися без обмежень. Він також стабілізований по всіх осях, що допомагає забезпечити стабільну зйомку. Відеозапис виконується в роздільній здатності 4K/30, а матриця на 12 Мп забезпечує високу якість зображень навіть при вечірньому освітленні. [25].

Переваги: незвичайний зовнішній вигляд, що змінюється в польоті; якісна зйомка відео в режимі 4K і непогані фото; стабілізована камера кругового огляду.

Недоліки: висока ціна для напівпрофесійного пристрою; для управління потрібна кваліфікація; малий об'єм батареї.

11. Оціночка характеристика БПЛА

В таблиці 1.1 наведено оціночну сітку найпопулярніших моделей дронів за версією порталу Geeksus.

Таблиця 1.1 – Оціночна сітка найпопулярніших моделей БПЛА

№	Модель	Функціонал	Вартість	Камера	Управління	Дизайн	Загальна оцінка
1	YUNEEC TyphoonH	10	8	10	9	9	9,2
2	DJI Mavic Pro	8	9	8	10	8	8,6
3	DJI Mavic Air	9	8	8	9	8	8,4
4	DJI Spark	7	8	7	7	8	7,4
5	DJI Phantom 3SE	9	9	8	8	7	8,2
6	YUNEEC TyphoonQ500 4K	8	8	8	8	9	8,2
7	Xiaomi Mi Drone 4K	8	10	7	9	8	8,4
8	Autel Robotics X-Star Premium	8	7	8	8	8	7,8
9	Xiro XPLORE R V	7	10	7	7	8	7,8
10	ParrotBebop Drone 2	7	9	7	8	7	7,6

1.3. Види і різновиди БПЛА

Справді, поява безколекторних електродвигунів та відповідних схем управління в 1980-х роках вирішила проблему складної трансмісії, яка передавала обертання одного мотора на кілька гвинтів, у гелікоптерах. Це ускладнювало розробку багатогвинтових гелікоптерів. Але завдяки розподіленій системі керованих індивідуальних електроприводів, встановлених на кожному гвинті, стало можливим створити малогабаритні БПЛА з конкурентними характеристиками.

Ця нова технологія дозволила забезпечити більшу ефективність та точність керування кожним гвинтом окремо, що покращує стабільність польоту та маневреність дрона. Кожен безколекторний електродвигун може бути індивідуально налаштований та керований, що дозволяє досягти оптимального розподілу тяги та керувати рухом дрона у просторі.

Ця технологія стала ключовим кроком у розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та дронів, дозволяючи створювати більш компактні, ефективні та маневрені пристрої зі збільшеними характеристиками польоту.

БПЛА можна розділити за притаманними їм особливостями будови і застосування. З розвитком їх конструювання з'явилося безліч різновидів, включаючи добре всім відомий квадрокоптер. Погляньмо на найбільш поширені варіанти сучасних апаратів. Так, дрони можуть бути класифіковані за різними критеріями, включаючи кількість двигунів та їх розташування.

Перша з них – це *бікоптери*. Бікоптер має два ротори. Схема апарату зображена на рисунку 1.1.

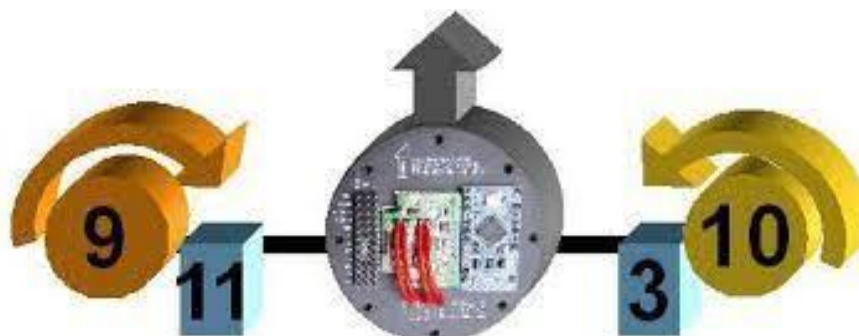


Рисунок 1.1 – Схема пристрою бікоптера

Особливості: ротори обертаються в протилежних напрямках з метою компенсації реактивного моменту. Стабілізація апарату досягається відхиленням моторів за допомогою сервоприводів (6 і 2).

Переваги: низьке енергоспоживання, маленькі габарити, низька вартість.

Недоліки: відмова одного двигуна веде до неминучого падіння, маленька вантажопідйомність, низька стабільність, складна конструкція.

Переважно, такі коптери використовуються в якості іграшок.

Трикоптери – безпілотні літальні апарати з трьома гвинтами-двигунами. Головний недолік такої системи полягає в поганій маневреності при виконанні повороту. Тому даний тип дронів використовується останнім часом все рідше. Величина корисного навантаження такої конструкції вкрай мала. Трикоптер має три ротора. Схема пристрою апарату зображена на рисунку 1.2.

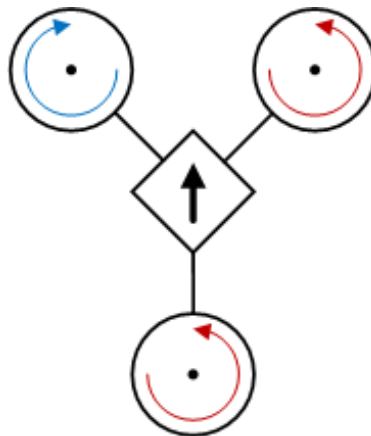


Рисунок 1.2 – Схема пристрою трикоптера

Особливості: два передніх мотора обертаються в протилежних напрямках, а третій в довільну сторону. Для компенсації реактивного моменту і повороту апарату проводиться відхилення хвостового двигуна за допомогою сервоприводу.

Переваги: невелика маса, компактність, це найбільш дешеві Мультикоптер, оскільки для їх побудови потрібно всього 3 мотора і 3 регулятора швидкості.

Недоліками таких апаратів є складна конструкція, маленька вантажопідйомність і при відмові одного двигуна коптер, неминуче, падає.

Тепер перейдемо до схеми Мультикоптера з найпопулярнішим розташуванням моторів.

Квадрокоптери – це найбільш поширена і розвинена конструкція літальних апаратів (дронів), які мають чотири двигуни. Квадрокоптери забезпечують стабільний польот та маневреність завдяки рівномірному розподілу тяги між чотирма гвинтами. (рисунок 1.2):

- «конфігурація +» – по одному двигуну спереду, ззаду та з боків;
- «конфігурація X» – половина двигунів знаходяться спереду, інша половина –ззаду;
- «конфігурація Y» – три двигуни розташовуються аналогічно з трикоптером, четвертий знаходиться над чи під одним із інших.

Схема пристрою апарату зображена на рисунку 1.3.

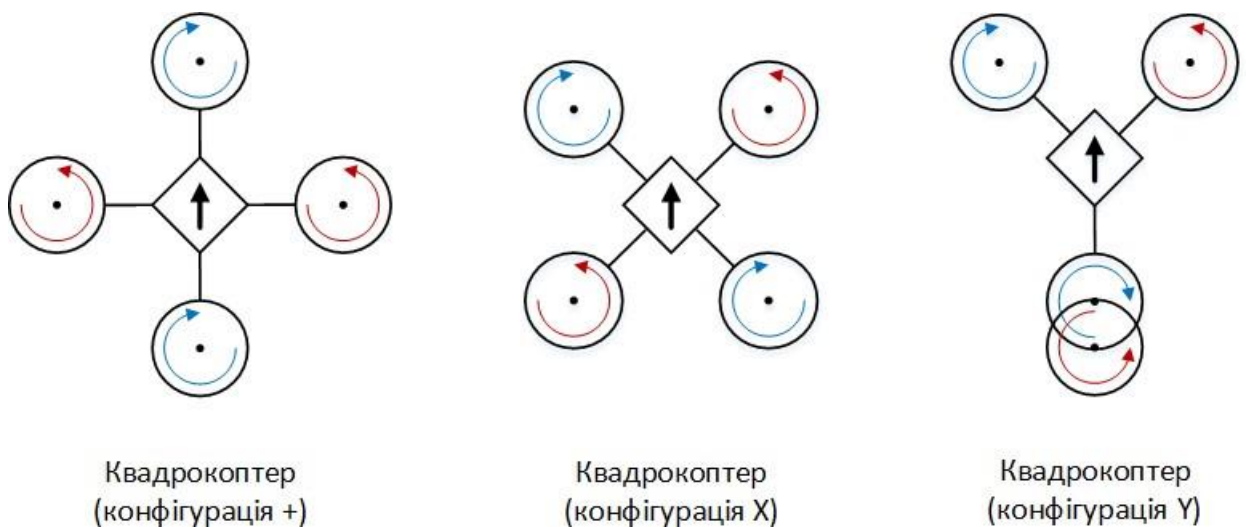


Рисунок 1.3 – Схема пристрою квадрокоптера

Особливістю таких апаратів є обертання моторів діагонально, в протилежних напрямках (наприклад, якщо мотори 1 і 3 обертаються по годинниковій стрілці, то мотори 2 і 4 – проти годинникової стрілки). Таким чином відбувається компенсація реактивного моменту.

Переваги: простота конструкції без застосування поворотних механізмів, як у двох попередніх апаратів. При установці потужних двигунів можна переносити корисне навантаження до 5 кг.

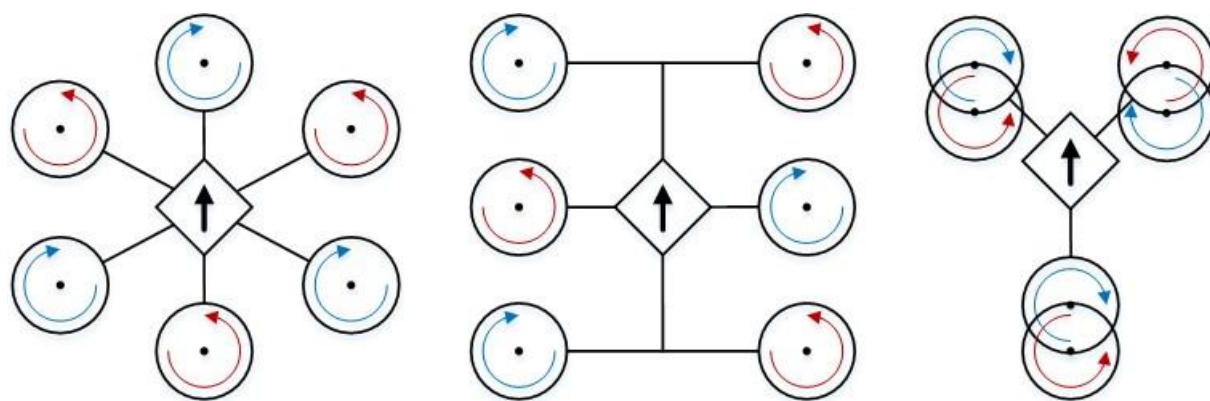
Недоліки: трата одного з двигунів порушує симетрію тяги і здатність до керування квадрокоптером. Коли одна сторона стає менш підтриманою, квадрокоптер може почати нахилитися і втратити рівновагу. Без відповідного контролю та корекції, це може призвести до падіння дрона.

У польоті такі коптери більш стійкі і здатні літати трохи довше – або за рахунок більш ємної батареї, або за рахунок більш економічного режиму роботи двигунів. Квадрокоптери також не здатні літати при поломці одного мотора, тому для серйозних застосувань вони малопридатні.

Гексокоптери та октокоптери, даний тип дронів відноситься до тяжких апаратів, які здатні переносити вантажі до 20 кг. Ці апарати мають складну конструкцію та потребують спеціальної установки і програмування польотного контролера. Гексакоптер має шість роторів. В залежності від розташування двигунів гексокоптер можна розділити на три типи:

- «стандартний» – двигуни розташовуються у формі зірочки;
- «конфігурація Н» – половина двигунів знаходяться зліва, інша половина – справа;
- «конфігурація Y» – двигуни розташовуються парами аналогічно з трикоптером.

Схема пристрою апарату зображена на рисунку 1.4



Гексокоптер

Гексокоптер
(конфігурація H)Гексокоптер
(конфігурація Y)

Рисунок 1.4 – Схема пристрою гексокоптера.

Вони вбирають в себе всі позитивні риси квадрокоптера.

Переваги: при відмові одного двигуна апарат не падає, велика вантажопідйомність, стабільність, маленька чутливість до вітру.

Недоліки: короткий час польоту, великі габарити і висока ціна.

Октокоптер має вісім роторів. Схема пристрою апарату зображена на рисунку 1.5.

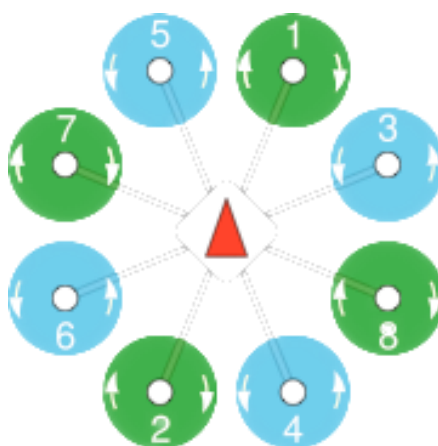


Рисунок 1.5 – Схема пристрою октокоптера.

Переваги: максимальна стабільність і несприйнятливості до вітру, при відмові одного і навіть двох моторів апарат не падає. Величезна вантажопідйомність (до 16-17 кг). Тільки цим апаратам можна довірити підйом в повітря таких дорогих камер, як RED EPIC і їй подібних.

Недоліками цих апаратів є величезне енергоспоживання і висока вартість.

Всі варіанти схем мультикоптерів можуть бути коаксіальними (на одному промені розташовані два мотора один над одним).

Переваги: більш стабільні при відмові моторів, мають менші габарити при, практично, тих же тягових характеристиках.

Наразі дрони з парним числом гвинтів (4, 6 або 8) є найбільш поширеними та розповсюдженими. Кожен гвинт приводиться в рух окремим двигуном. Половина гвинтів обертається за годинниковою стрілкою, а інша половина проти, що усуває необхідність хвостового гвинта. Цей тип дронів маневрує шляхом зміни швидкості обертання гвинтів.

Управління рухом дрона здійснюється за певними алгоритмами. Для здійснення підйому необхідно збільшити швидкість обертання всіх гвинтів шляхом підвищення керуючої напруги, що подається на двигуни. Для руху вперед або назад потрібно прискорити гвинти з одного боку і зменшити швидкість гвинтів з іншого боку. Для здійснення повороту необхідно прискорити гвинти, які обертаються за годинниковою стрілкою, і зменшити швидкість гвинтів, що обертаються проти, або навпаки. Робота двигунів при керуванні рухом дрона показана на рисунку 1.6. Управління двигунами здійснюється за допомогою мікропроцесора, який має вбудовані програми для вищезазначених режимів руху дрона. Для забезпечення стабільного керування дрон оснащений гіроскопами, барометрами, акселерометрами, магнітомерами та іншими пристроями.

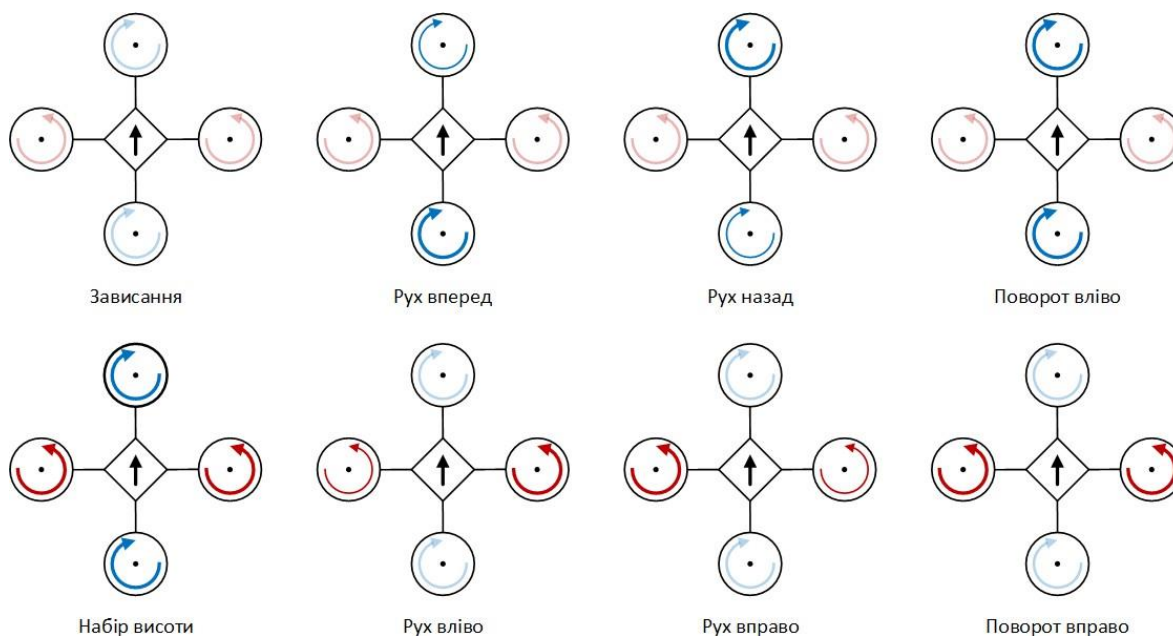


Рисунок 1.6 – Робота двигунів при управлінні рухом квадрокоптера

Для подальшого дослідження був обраний дрон з чотирма двигунами, оскільки його конфігурації достатньо для поставлених цілей: він має менший розмір порівняно з гексокоптером чи октокоптером; корисне навантаження, яке він може переносити достатнє для утримання відеоапаратури на борту; він відносно дешевий.

1.4. Спрощена класифікація БПЛА

Застосування різних видів БПЛА, які класифіковані на рисунку 1.6, залежить від їх технічних можливостей, які визначають професійну специфіку фахівців у цій галузі. Наприклад, БПЛА літакового і вертолітного типів відрізняються застосуванням через свої технічні характеристики. Літакові БПЛА мають меншу вагову ефективність з двох причин. По-перше, відсутність злітної смуги під час зльоту і посадки змушує апарат зазнавати значних перевантажень, що вимагає жорсткішої конструкції та максимального зниження ваги. По-друге, якщо злітна смуга знаходиться на значній відстані від місць застосування, БПЛА має багато часу на досягнення місця роботи, що вимагає великої кількості палива і зменшує масу корисного

навантаження. Крім того, літакові БПЛА обмежені мінімальною необхідною польотною швидкістю і не можуть летіти в режимі зависання [6].

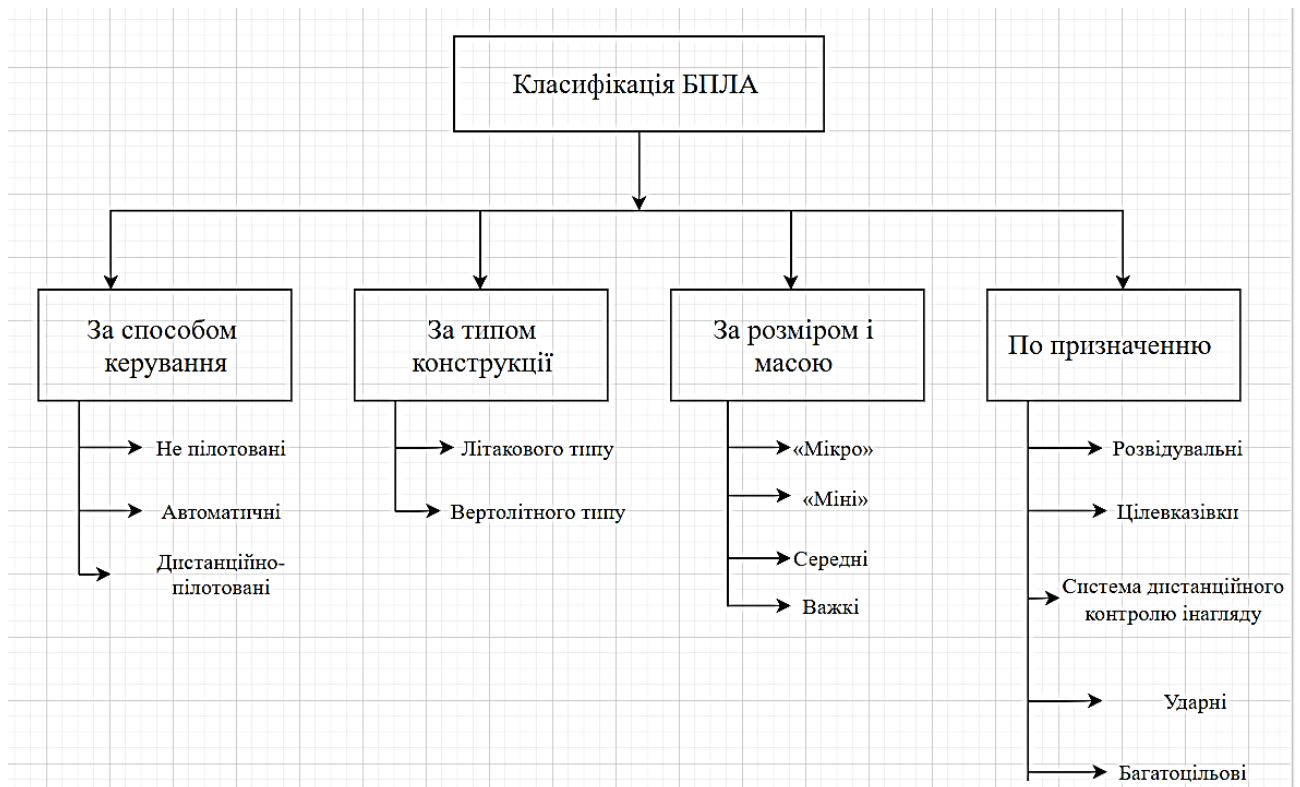


Рисунок 1.7 – Спрощена класифікація БПЛА

Видатність БПЛА вертольотного типу також обмежена, але у деяких випадках їх застосування має більші переваги. Один з типових сценаріїв, для яких використовують вертольотні БПЛА, – це моніторинг різних об’єктів. Квадрокоптер є одним з найбільш поширених представників вертольотних БПЛА, зображення якого можна побачити на рисунку 1.8.

Квадрокоптер – це мультикоптер з чотирма роторами, який відрізняється від вертольотів тим, що кожен з його гвинтів забезпечує підйомну силу, а його польотна стабільність є вищою. Зовнішній вигляд квадрокоптера можна побачити на рисунку 1.8.

Варто зауважити, що квадрокоптер є складним технічним пристроєм, який має динаміку, що не моделюється та схильний до впливу зовнішніх збурень. Управління квадрокоптером є цікавою темою з наукової та практичної точок зору, оскільки вимагає вирішення ряду складних завдань.



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд квадрокоптера

1.5. Особливості управління квадрокоптера

В світі існує безліч різноманітних пультів управління, проте усі вони мають спільний принцип дії: кожен пульт містить як мінімум два важелі управління, також відомі як стики або джойстики, які відповідають за орієнтацію квадрокоптера в повітрі, зокрема за його рух вздовж трьох осей координат та обертання. На рисунку 1.9 зображена типова схема пульта дистанційного керування квадрокоптера. Кожен важіль на пульті дистанційного керування квадрокоптером відповідає за певну функцію в повітрі.

- Лівий важіль впливає на вертикальну площину руху і поворот квадрокоптера навколо цієї площини.
- Наприклад, якщо перемістити важіль вгору, квадрокоптер почне набирати висоту, а при переміщенні вниз, він стане опускатися.
- Пересування квадрокоптера вліво – переміщення правого важеля вліво зумовить обертання квадрокоптера на місці вліво.
- Пересування квадрокоптера вправо – переміщення правого важеля вправо зумовить обертання квадрокоптера на місці вправо.
- Правий важіль контролює тангаж та крен.
- Тангаж вниз – квадрокоптер нахилиться вниз спереду.

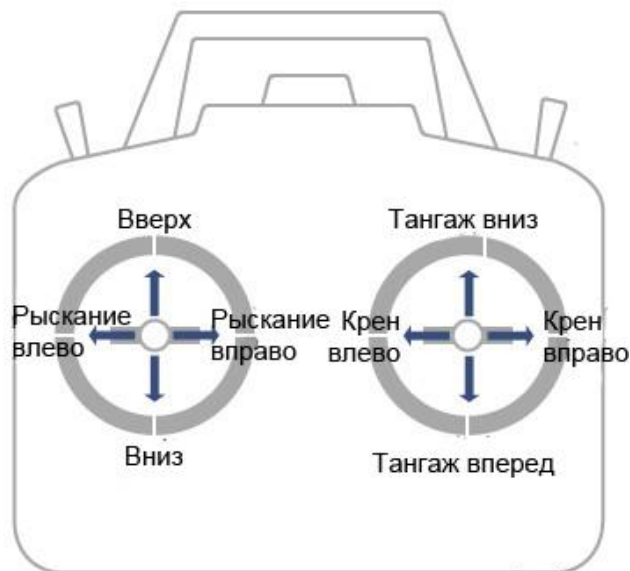


Рисунок 1.9 – Схема пульта дистанційного керування квадрокоптера

- Тангаж вгору – квадрокоптер нахилиться вгору спереду.
- Крен вліво – переміщення джойстика вліво зумовить нахил квадрокоптера вліво.
- Крен вправо – переміщення джойстика вправо зумовить нахил квадрокоптера вправо.

Сучасні квадрокоптери можуть працювати в різних режимах польоту, зазвичай у радіокерованого дрона є три режими, але може бути більше. Ці режими включають:

- 1 Ручний режим польоту – в цьому режимі управління квадрокоптером повністю залежить від оператора, жодна з внутрішніх систем не стабілізує його в певній площині. Це найскладніший режим, рекомендований досвідченим користувачам.
- 2 Стабільний режим польоту / Режим орієнтації в просторі – в цьому режимі використовується акселерометр, який допомагає стабілізувати квадрокоптер в певній площині. Цей режим підходить для новачків, які тільки починають вивчати керування квадрокоптером.
- 3 Стабілізація за допомогою системи GPS – квадрокоптери, які мають вбудований GPS, можуть використовувати цей режим. Він

призначений для зйомки якісних відео та фото, оскільки дозволяє точно утримувати квадрокоптер на місці. За допомогою GPS також можна здійснювати автопілотування, утримування висоти та напрямку польоту.

1.6. Постановка задач дослідження

Основною задачею дослідження в даній роботі є досягнення більш ефективного керування безпілотним літаючим апаратом, щоб забезпечити більш точне переміщення за визначеним маршрутом та збільшити стабільність польоту. Для цього в проєкті були поставлені наступні завдання:

1. Проведення огляду предметної області та аналізу існуючих рішень;
2. Розроблення функціональної схеми системи керування квадрокоптером;
3. Проектування моделі в середовищі Simulink/MATLAB, яка дозволяє проводити оцінку системи стабілізації і системи управління літальним апаратом для квадрокоптера, виконаного за аеродинамічною схемою «квадрокоптер» без запуску самого квадрокоптера;
4. Аналіз показників стійкості та якості змодельованої системи керування квадрокоптером;
5. Розгляд питань охорони праці та цивільного захисту.

1.7. Висновки до розділу 1

Детально описано розвиток БПЛА, їх види, наведена класифікація апаратів. Розглянуті особливості управління квадрокоптера. Визначені головні задачі дослідження в магістерській науковій роботі.

2 СКЛАД ЕЛЕМЕНТІВ БПЛА НА ПРИКЛАДІ КВАДРОКОПТЕРА

2.1. Компоненти БПЛА

На структурній схемі (рисунок 2.1) зображені основні компоненти комплексу БПЛА, який у нашому випадку є квадрокоптером або мультикоптером з чотирма двигунами, та їх взаємозв'язок. Окрім системи автоматичного управління, яка є основним елементом комплексу і забезпечує автономність польоту БПЛА, у бортову систему літаючого апарату також входять наступні компоненти:

- приймач радіосигналу (2.4 ГГц), який приймає сигнал від передавача для ручного управління апаратом;
- контролери двигунів, які приймають вхідний сигнал ШІМ (Pulse-Width Modulation), що надходить від системи управління, та встановлюють заданий режим роботи кожного з двигунів.

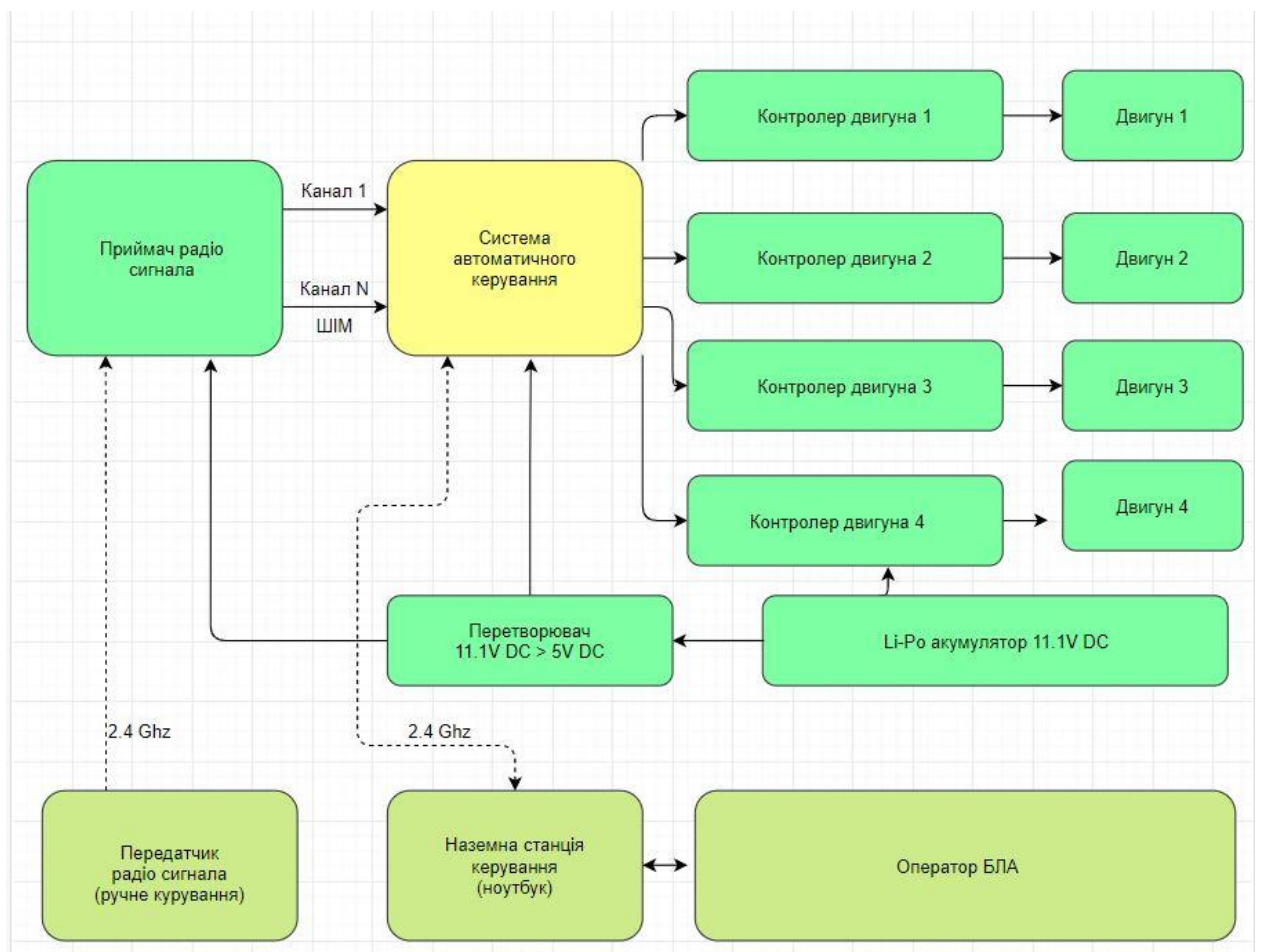


Рисунок 2.1 – Структурна схема комплексу БПЛА

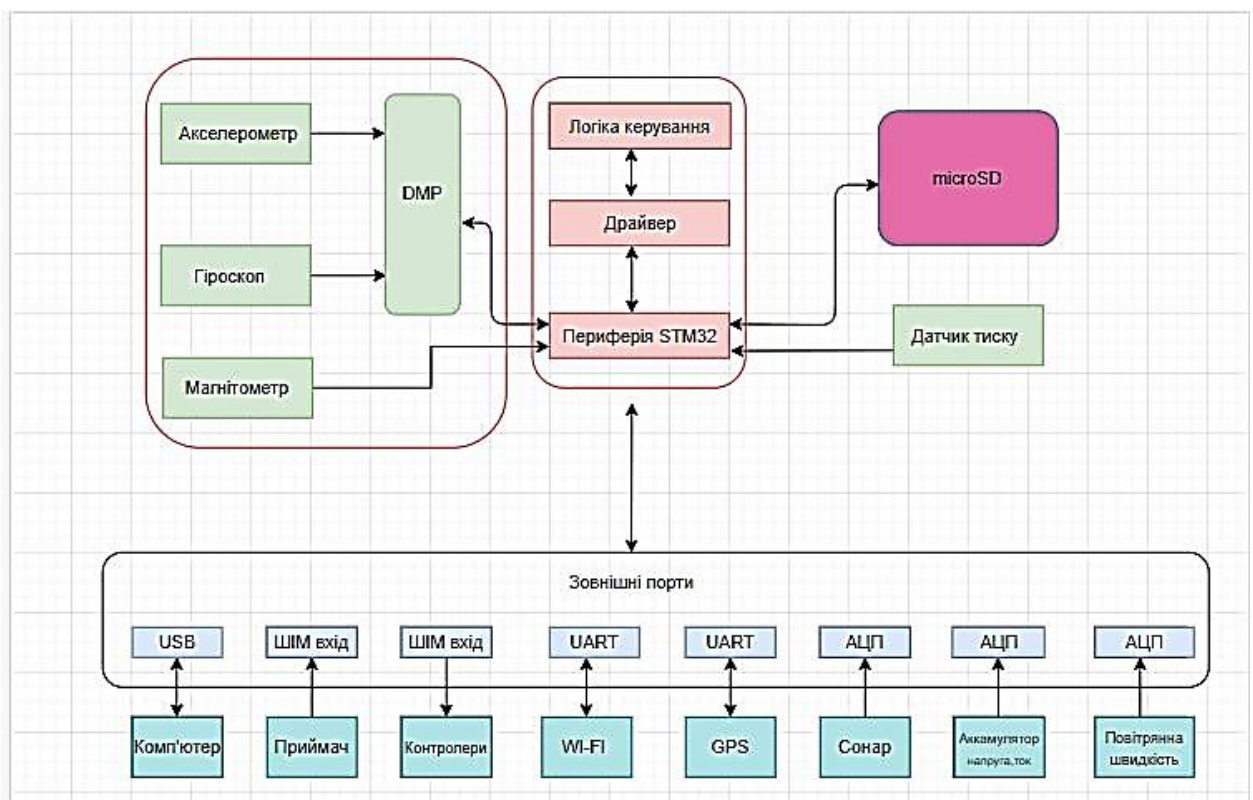
Комплекс БПЛА включає:

- літій-полімерний (LIPO) акумулятор з напругою 11,1 В, який використовується для живлення двигунів та DC-DC перетворювачів, що забезпечують живлення системи управління та приймача аудіосигналу, які вбудовані в контролери двигунів.
- ноутбук в якості наземної станції управління і налагодження.

Компоненти системи управління

Давайте більш докладно розглянемо компоненти системи автоматичного управління. Основною складовою комплексу є система керування, яка відіграє ключову роль у функціонуванні всієї системи. Нижче наведена структурна схема (рисунок 2.2), яка детально описує компоненти цієї системи.

Рисунок 2.2 – Структурна схема компонентів системи керування



За структурною схемою, яка була наведена раніше, можна зрозуміти, що ключовим компонентом системи є мікроконтролер. Для даної розробки було обрано мікроконтролер STM32F103RCT6 від компанії STMicroelectronics, який працює на базі ядра ARM Cortex M3 з тактовою частотою 72 МГц та

має 256 КБ флеш-пам'яті. Цей мікроконтролер має достатньо високу продуктивність для успішного виконання необхідних завдань. Програмний код для мікроконтролера можна розділити на три складові частини:

- периферія STM32 – це набір бібліотек, які дозволяють програмістам простіше та швидше працювати з різними пристроями, що входять в систему керування, наприклад, I2C, SPI, USB, PWM та інші. Ці бібліотеки дають змогу забезпечити зв'язок між мікроконтролером та зовнішніми пристроями, та забезпечують їх правильну роботу.
- драйвер – це програмне забезпечення, яке дозволяє мікроконтролеру обмінюватися даними з іншими пристроями, такими як акселерометри, гіроскопи, магнітометр, барометр, GPS-приймач, модуль бездротового телеметрії, microSD-карта пам'яті та інші. Драйвер містить набір бібліотек, спеціально створених для передачі даних між мікроконтролером та цими пристроями.
- логіка управління польотом – це високорівневі функції, які забезпечують стабілізацію та навігацію літального апарату. Ці функції дозволяють контролювати рухи літака та забезпечувати стабільність польоту. Їх робота базується на даних, що надходять з датчиків, які зчитують інформацію про рух та стан літака, а також на вхідних даних, які вводяться оператором через інтерфейс користувача.

У системі управління дроном використовуються різні сенсори, включаючи МЕМС (мікро електромеханічну систему) – інерціально-вимірювальну систему (ІВС), що містить 3-осьовий акселерометр, 3-осьовий гіроскоп та 3-осьовий магнітометр, підключені до процесора за допомогою інтегральних схем. Система використовує MPU6050 від компанії InvenSense з технологією DMP (Digital Motion Processing) для обробки кутових швидкостей та прискорень з фільтрацією Калмана. Крім того, є цифровий барометр для визначення висоти та магнітометр для визначення курсу.

Для зберігання конфігураційних файлів і записів параметрів польоту використовується слот для microSD карти пам'яті. Для зчитування сигналів з приймача і керування контролерами двигунів використовуються входи і виходи ШІМ, а для вимірювання висоти та швидкості – входи АЦП для підключення ультразвукового сонара та диференціального датчика тиску. Моніторинг напруги та струму батареї також здійснюється за допомогою входів АЦП.

Для забезпечення комунікації використовуються два UART порту для підключення модулів GPS і бездротової телеметрії, а також USB інтерфейс для налагодження і тестування програмного забезпечення. Електрична схема розроблена у пакеті EagleCAD та розведена на чотиришаровій друкованій платі розміром 60x40 мм з двостороннім розміщенням електронних компонентів (рисунок 2.3).

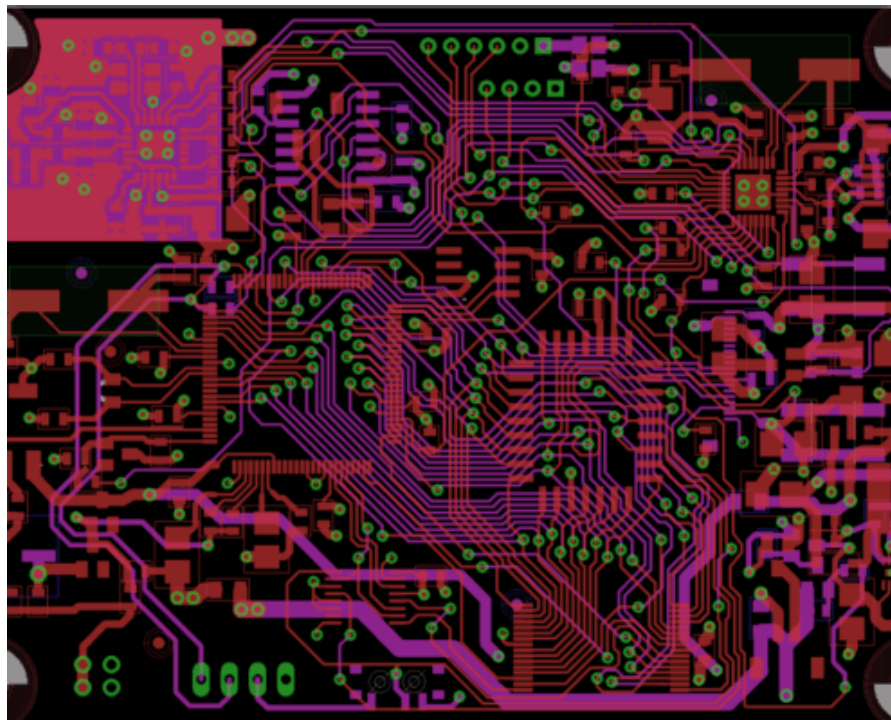


Рисунок 2.3 – Розведення плати по шарам

Перед початком виготовлення друкованих плат була згенерована 3D-модель плати (рисунок 2.4).

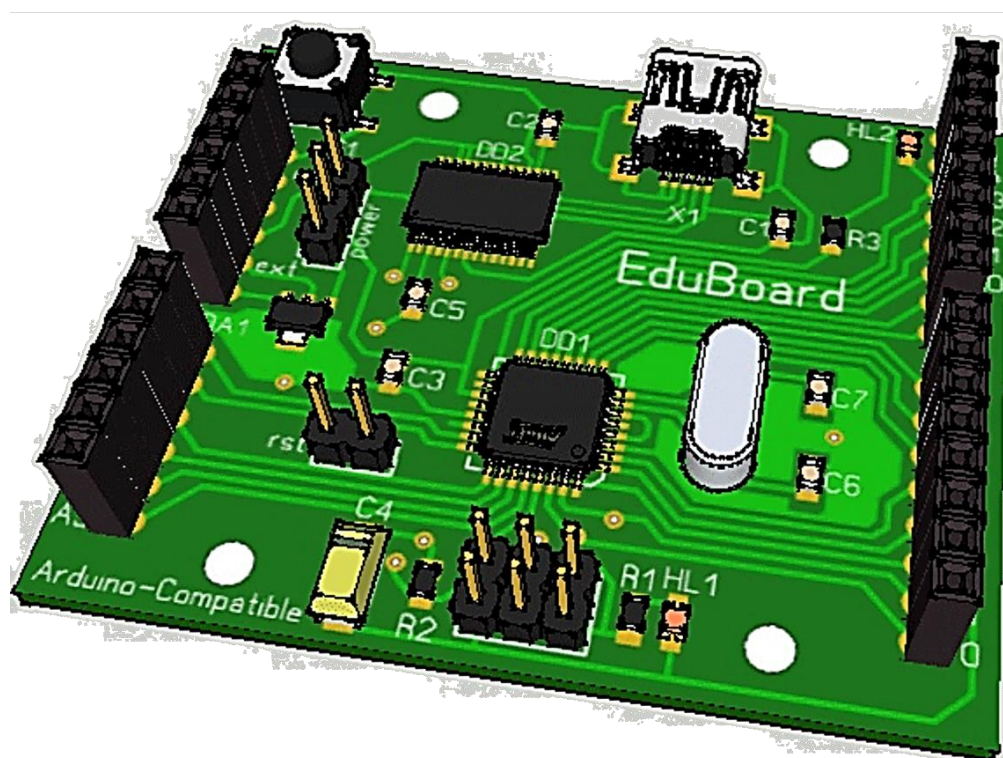


Рисунок 2.4 – 3D-моделі друкованих плат

На рисунку 2.5 наведено фотографію готової зібраної плати, вид.

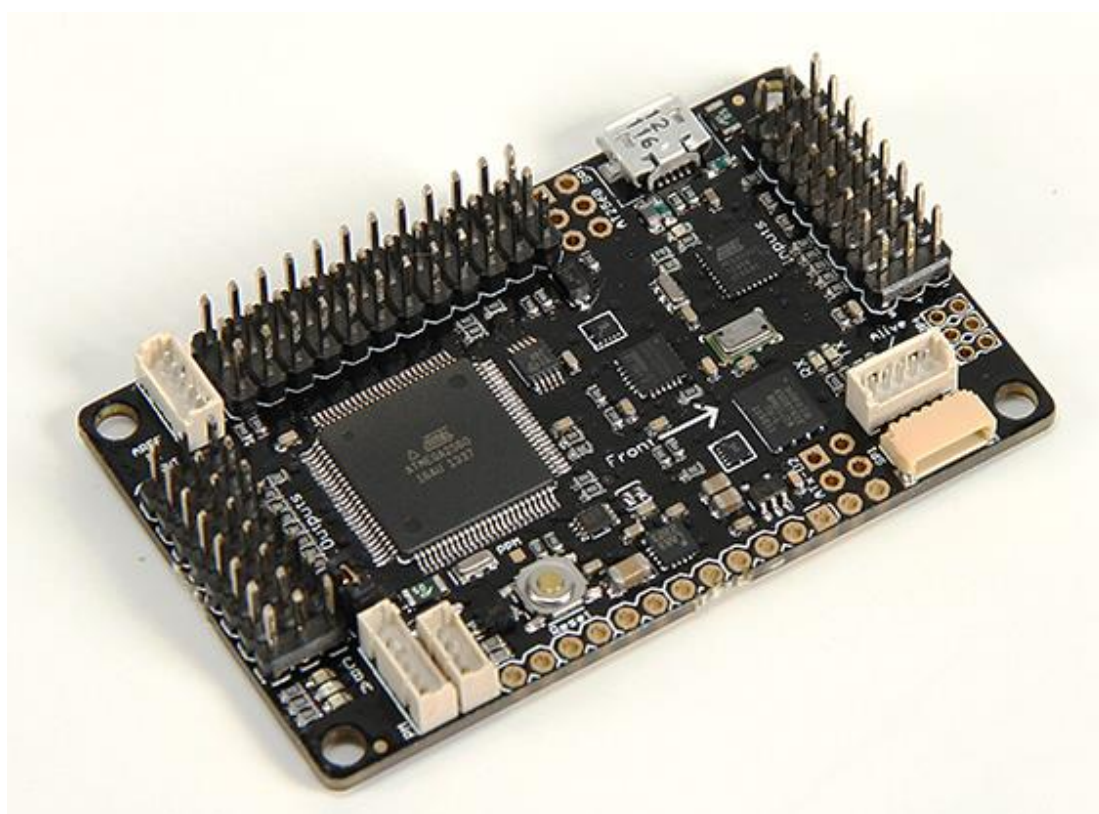


Рисунок 2.5 – Фотографія готової друкованої плати

2.2. Принципи обробки інформації з датчиків квадрокоптера

Як було зазначено раніше, програмне забезпечення може бути розділено на три групи: периферійні пристрої процесора, драйвери та логіка управління польотом.

- Периферійні пристрої процесора були ініціалізовані спочатку, включаючи необхідність написання коду для ініціалізації мікроконтролера та USB інтерфейсу. Останній було налаштовано для роботи в режимі віртуального СОМ порту, що дозволило здійснювати комунікацію з системою керування за допомогою термінального клієнта. Обмін даними здійснювався через переривання (Interrupt Mode) або прямий доступ до пам'яті (DMA - Direct Memory Access).
- Драйвери, з іншого боку, відіграють важливу роль у процесі отримання фізичних даних з сенсорів та керування актуаторами (контролерами двигунів). Більше уваги було приділено опису розробки драйверів, оскільки це є критично важливим для правильної роботи системи керування.

Інерціально-вимірювальна система

Одним з найбільш важливих компонентів є інерціально-вимірювальна система (ІВС), що складається з цифрового 3-осьового МЕМС акселерометра та 3-осьового МЕМС гіроскопа. Це дозволяє точно визначати поточну орієнтацію літаючого апарату в просторі, що у свою чергу забезпечує можливість подальшої стабілізації.

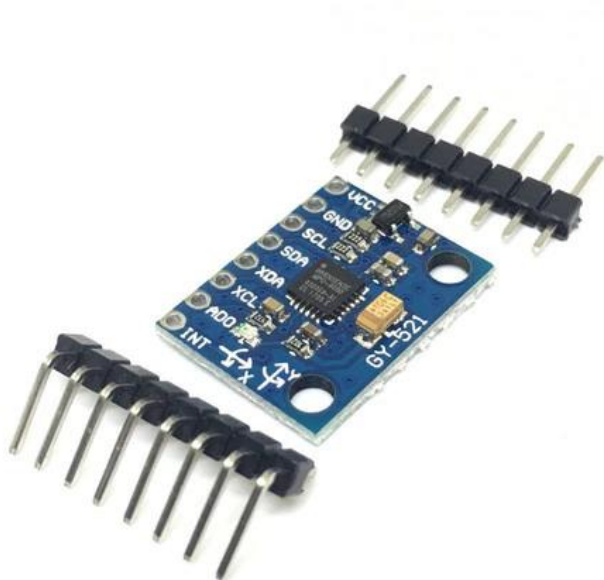


Рисунок 2.6 – Інтегральна схема ІВС

У компанії InvenSense розроблена інтегральна схема ІВС MPU-6050, яка має розміри 4x4x0.9 мм і включає в себе 3-осьовий акселерометр та 3-осьовий гіроскоп з процесором обробки руху в одному корпусі. На рисунку 2.6 зображена ця інтегральна схема ІВС. Рисунок 2.7 демонструє розташування ІВС та його осей на друкованій платі системи керування, а також розташування друкованої плати відносно осей літаючого апарату. У системі відліку, пов'язаній з літаючим апаратом, вимірюються прискорення в напрямку відповідних осей (a_x , a_y , a_z) та кутові швидкості обертання навколо відповідних осей (Ω_x , Ω_y , Ω_z).

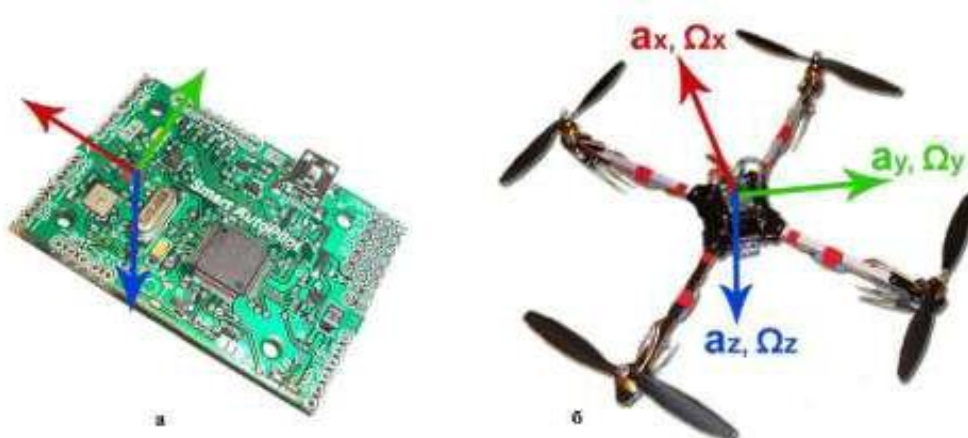


Рисунок. 2.7 – Розташування осі ІВС на друкованій платі системи керування: а – розташування осей щодо друкованої плати; б – розташування осей щодо апарату

Для визначення кута повороту навколо її осі застосовується наступна формула, де t_1 та t_2 – час вимірювання на початку та в кінці відповідно:

$$\alpha_i = \int_{t_1}^{t_2} \Omega_i dt \quad (2.1)$$

Для вимірювання кута нахилу навколо її осі літального апарату використовується проекція вектора уявного прискорення R на відповідну ось. Ця проекція позначається як R_x , R_y , R_z для осей X , Y , Z відповідно. Характерний час між початком і завершенням вимірювання становить 5 мс, що відповідає частоті вимірювання 200 Гц. Це дозволяє акселерометрам компенсувати відхилення гіроскопів і визначати початкові кути відліку:

$$\alpha_i = \arccos \frac{R_i}{R}, \text{ де } R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}. \quad (2.2)$$

Для компенсації відхилень від кута рискання, вимірюваного віссю Z гіроскопа, застосовується зовнішній магнітометр. Крім того, акселерометр не може компенсувати дану величину, коли літальний апарат перебуває в положенні з нульовим креном та тангажем. Після того, як дані про кути крену, тангажу і рискання були отримані з акселерометра, гіроскопа та магнітометра, вони пройшли процеси злиття та фільтрації, щоб надати інформацію про поточні кути. Цей принцип вимірювань та обробки даних використовується внутрішнім процесором інтегральної схеми ПС, який відомий як DMP [13].

Для тестування та налагодження ПС було розроблено додаток, який використовує фреймворк Processing © [14]. Цей додаток відображає паралелепіпед, орієнтація якого відповідає орієнтації плати в просторі. На рисунку 2.8 показано фотографію системи керування, де на моніторі запущено цей додаток.

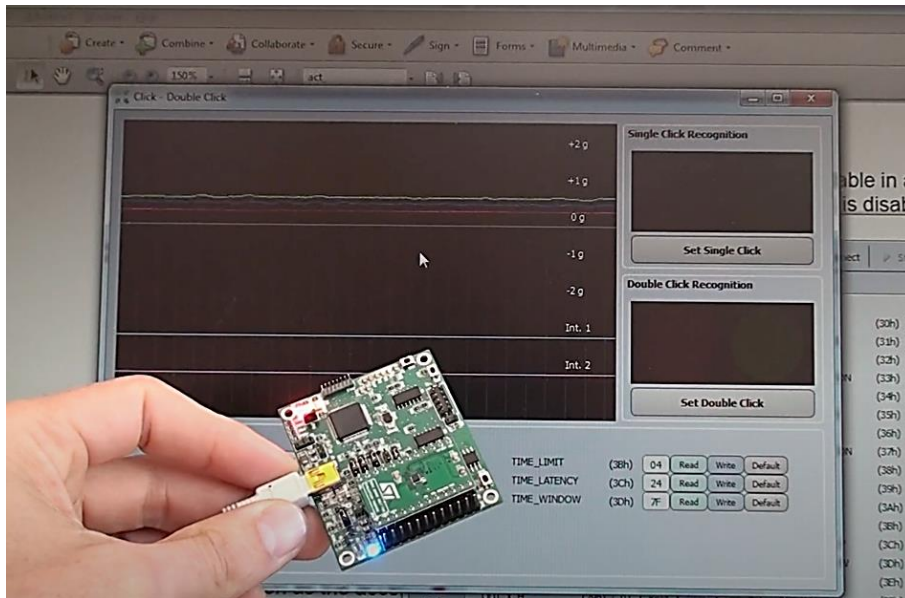


Рисунок 2.8 – Додаток для налагодження ПС

Датчик тиску і сонар для визначення висоти

Для вимірювання висоти використовуються два типи датчиків – цифровий датчик тиску на основі МЕМС-технології та ультразвуковий сонар. Залежність між висотою та атмосферним тиском можна описати за допомогою наступної формули та графічно зобразити на рисунку 2.9:

$$H = 44330 \left(1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{5.255} \right), \quad (2.3)$$

де P – тиск на висоті H ;

P_0 – тиск над рівнем моря (101325 Па).

Згідно з технічними характеристиками датчика тиску Bosch BMP085, який на даний момент є одним з найточніших, точність вимірювання становить 0.03 гПа, що відповідає похибці в 0.25 м. Однак, при тестуванні було виявлено, що датчик сприймає високочастотний шум коливань повітря, що призводить до розкиду вимірювань близько 2 м, що неприпустимо для завдань, які виконує літаючий апарат (наприклад, автономний політ на висоті

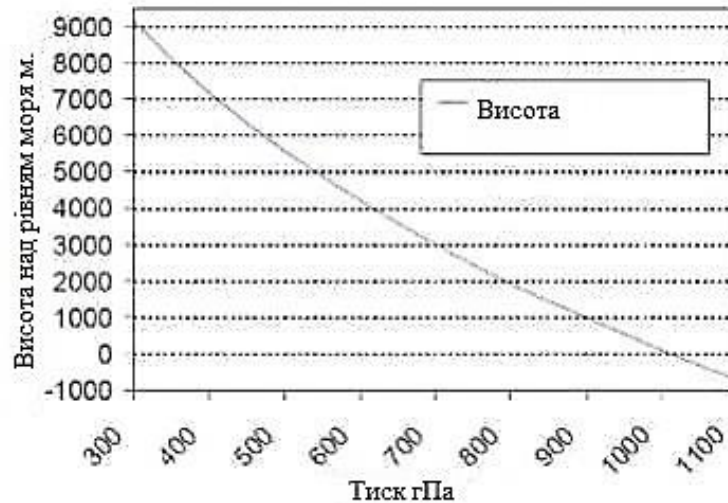


Рисунок 2.9 – Залежність зміни висоти від тиску

близько 2 м і нижче). Використання усереднюючого фільтра не дало задовільних результатів через його запізнювання. Тому було вирішено застосувати фільтр Калмана, який використовує метод екстраполяції даних з подальшим коректуванням відхилень. На рисунку 2.10 зображені результати вимірювань на постійній висоті, де червона лінія представляє вихідні дані з барометра, а синя лінія відображає ту ж величину, але після проходження фільтра Калмана. Графік показує, що після застосування фільтрації розкид висоти становить не більше 0.8 м.

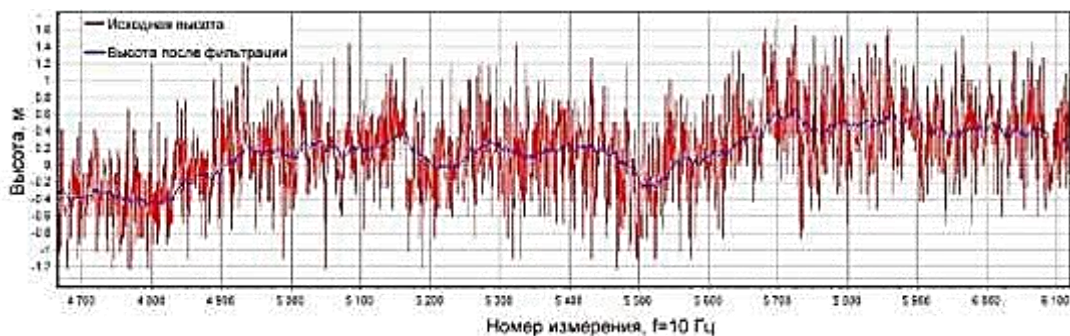


Рисунок 2.10 – Результати вимірювань і фільтрації барометричних даних висоти

Для забезпечення високої точності вимірювання висоти на висотах до 6 метрів використовується ультразвуковий сонар, який має роздільну здатність 1 см. В якості сонару для даної системи управління обрано XL-MaxSonar EZ-

0 (рисунок 2.11), що працює на частоті 42 кГц, має область чутливості, яка представлена на рисунку 2.12, і підключений до входу АЦП мікроконтролера [26].



Рисунок 2.11 – Ультразвуковий сонар XL – MaxSonar EZ-0

Рисунок 2.12 – Область чутливості сонара

Висота H (см), виміряна ультразвуковим сонаром, обчислюється за такою формулою:

$$H = \frac{U_B}{0.0049}, \quad (2.4)$$

де U_B – вихідна напруга (В).

GPS-приймач для визначення положення у просторі

Для визначення місцезнаходження літального апарату використовується GPS-приймач, який підключений до системи управління через UART порт. GPS-приймач передає дані з частотою 10 Гц у форматі

NMEA [16] (від англ. National Marine Electronics Association), які містять інформацію про поточну широту, довготу, висоту, швидкість, курс, час і т.д.

Система автоматичного керування обробляє та розбирає NMEA строки та зберігає інформацію у відповідні змінні. В результаті тестів було встановлено, що точність GPS позиціонування становить не більше 2-3 метрів та є залежною від навколишнього електромагнітного поля. Навігація за допомогою GPS є можливою лише в умовах, коли небо відкрите, оскільки сигнал GPS досить слабкий.

Датчик повітряної швидкості для визначення швидкості польоту

Система управління також має можливість приймати вхідний сигнал від аналогового диференціального датчика тиску для точного вимірювання поточної швидкості польоту.

Відповідно до рівняння Бернуллі:

$$P = P_c + \frac{\rho V^2}{2}, \quad (2.5)$$

де P – повний тиск;

P_c – статичний тиск;

ρ – щільність повітря;

V – швидкість потоку, що набігає.

Звідси швидкість набігаючого потоку:

$$V = \sqrt{\frac{2(P - P_c)}{\rho}}, \quad (2.6)$$

Щоб виміряти різницю тисків, використовується датчик, а величина $P - P_c$ відображає саме цю різницю. Для зчитування даних з радіоуправління та управління обертами двигуна використовується сигнал ШІМ, де імпульс

тривалістю 1 мс відповідає мінімальному стану, а 2 мс - максимальному. Частота оновлення стану сигналу для управління обертами двигуна складає Гц. Крім цього, у системі управління передбачений слот для microSD карти, який дозволяє записувати і аналізувати польотну інформацію. Після успішного розроблення та протестування програмного забезпечення для зчитування даних з датчиків і їх обробки, наступним етапом є розробка алгоритмів та програмування логіки управління польотом.

2.3. Алгоритми логіки управління польотом БПЛА

Раніше було зазначено, що управління польотом літака може бути здійснене як вручну, так і автоматично. Крім того, існує ієрархічна структура режимів польоту, де кожен наступний режим з більш високим рівнем автономності включає в себе алгоритми попереднього режиму, який має менший рівень автономності.

Система управління включає наступні режими польоту, кожен з яких буде детально описаний нижче:

- Ручний режим – управління повністю здійснюється оператором.
- Режим стабілізації – управління здійснюється оператором, але літак автоматично підтримує нульовий крен, тангаж і стабілізує кут курсу при відсутності дій з боку оператора, забезпечуючи утримання літака в повітрі.
- Режим утримання висоти – літак автоматично витримує висоту, яка була на момент включення цього режиму, використовуючи дані сонара і датчика тиску.
- Режим утримання позиції за допомогою GPS – літак автоматично витримує позицію, яка була на момент включення даного режиму, використовуючи дані з GPS-приймача.

- Режим повернення на точку старту – літак автоматично повертається на точку зльоту, незалежно від його поточного стану, і переходить в режим утримання позиції.
- Режим автоматичного польоту по точках – літак автоматично слідує по заданому маршруту.
- Режим автоматичного зльоту і посадки – літак автоматично здійснює зльот і посадку.

Ручний режим

У даному режимі польоту відбувається перетворення величин відхилення джойстиків крену, тангажу та ристання пульта управління (зображених на рисунку 2.13) на відповідну різницю числа обертів двигунів (зображену на рисунку 2.14). Середнє значення цих обертів відповідає поточному стану джойстика газу.



Рисунок 2.13 – Передавач радіоуправління

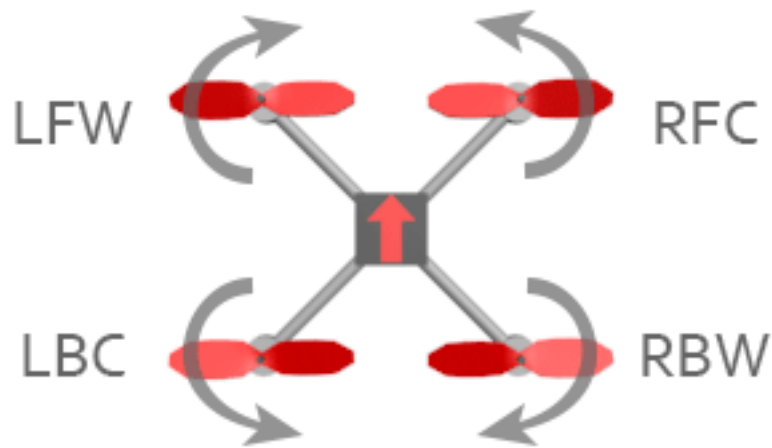


Рисунок 2.14 – Напрямок обертання двигунів

Режим стабілізації

У системі управління літаком для стабілізації кутів обертання (крен, тангаж, рискання) використовується PI-регулятор, що складається з пропорційної та інтегральної складових. Кожна з осей обертання має свій власний регулятор, який виконує стабілізацію відповідної осі. Схема цього регулятора представлена на рисунку 2.15.

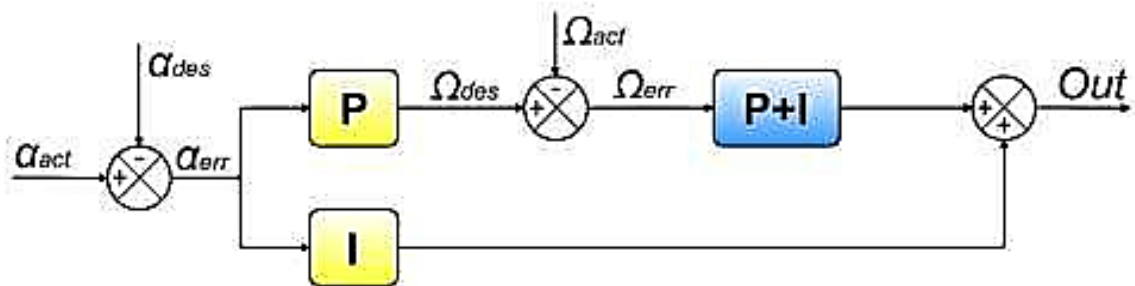


Рисунок 2.15 – Схема PI-каскаду управління стабілізацією кута

- α_{act} – це поточне значення кута в градусах, яке отримується з Інерційно-навігаційної системи (ІНС);
- α_{des} – це бажане значення кута в градусах;
- Ω_{act} – це поточна кутова швидкість обертання навколо осі α , виміряна в градусах за секунду;

- Ω_{des} – це бажана кутова швидкість обертання навколо осі α , виміряна в градусах за секунду;
- α_{err} – це поточна помилка кута α , яка визначається як різниця між бажаним і поточним значеннями кута α ;
- Ω_{err} – це поточна помилка кутової швидкості обертання навколо осі α , яка визначається як різниця між бажаною і поточною кутовою швидкістю обертання навколо осі α ;
- Out – це вихідний сигнал ШІМ (в мілісекундах), який відправляється на мікшер сигналів відповідно до конфігурації літаючого апарату (кількість двигунів).

Далі для визначення бажаної кутової швидкості обертання, використовується формула, яка залежить від поточної помилки кута α .

$$\Omega_{des} = k_a \alpha_{err}, \quad (2.7)$$

У формулі, k_{α}^p є коефіцієнтом посилення за кутом. Швидкість повороту, яку ми хочемо досягти, порівнюється з поточною і різниця визначає помилку кутової швидкості.

$$\Omega_{err} = \Omega_{des} - \Omega_{act} \quad (2.8)$$

де k_r^p – пропорційний коефіцієнт посилення по кутовий швидкості.
Виходить:

$$Out = k_r^p [k_{\alpha}^p \alpha_{err} - \Omega_{act}] + k_r^i \int (k_{\alpha}^p \alpha_{err} - \Omega_{act}) dt + k_a^i \int \alpha_{err} dt, \quad (2.9)$$

Інтегральні коефіцієнти посилення k_{α}^p , k_r^p , k_a^i , k_r^i визначаються експериментально з урахуванням характеристик конкретного літака, таких як маса, момент інерції, характеристики двигунів та контролерів швидкості. Це необхідно для досягнення максимальної ефективності

керування літаком в різних умовах. Коефіцієнти посилення k_r^i та k_a^i відображають посилення керування від кутової швидкості та кута відхилення, відповідно.

Реакція на зміну бажаного кута представлена на графіку (рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Реакція системи на зміну бажаного кута

Режим утримання висоти

В цьому режимі використовується РІ-регулятор з пропорційною та інтегральною складовими, але з іншими вхідними сигналами: висота H використовується замість α , а вертикальна швидкість V_v – замість Ω .

Графік реакції на зміну бажаної висоти представлений на рисунку 2.17.

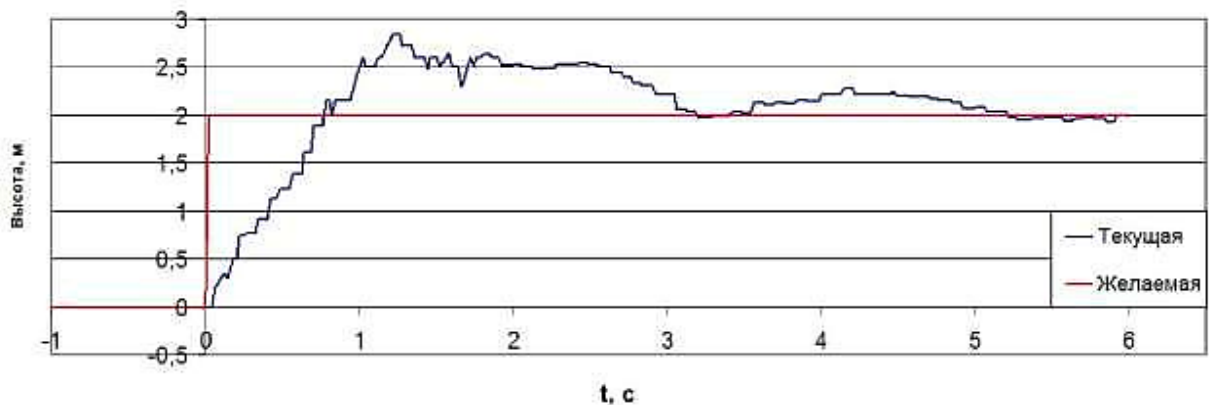


Рисунок 2.17 – Реакція системи на зміну бажаної висоти

Режим утримання позиції

Можна переформулювати наступним чином: Як зазначалося раніше, для коректної роботи даного режиму необхідно отримати дані з GPS-приймача. За протоколом NMEA координати широти і довготи відображаються у

форматі, що складається з градусів, хвилин та частки хвилини: широта – DDMM.MMMM, довгота – DDDMM.MMMM. Проте, цей формат не є зручним для подальшого використання у обчисленнях, тому виконується перерахунок координат в наступний формат: широта – DD.DDDDDD, довгота – DD.DDDDDD, де D позначає систему вимірювання в частках градуса, а M – в частках хвилини. Для здійснення перекладу використовуються такі формули, де LAT – широта (від англ. Latitude), LON – довгота (від англ. Longitude), а функція Floor() застосовується для округлення чисел до цілих у меншу сторону.

$$LAT_D = \text{floor}\left(\frac{LAT_M}{100}\right) + \left[\frac{LAT_M - 100\text{floor}\left(\frac{LAT_M}{100}\right)}{60}\right],$$

$$LON_D = \text{floor}\left(\frac{LON_M}{100}\right) + \left[\frac{LON_M - 100\text{floor}\left(\frac{LON_M}{100}\right)}{60}\right],$$

Оскільки PI-каскад для стабілізації позиції за допомогою GPS працює на аналогічних принципах, як описаний вище, відстань, яку вимірюють в метрах, може бути використана в якості вхідної величини. Для цього необхідно знати, скільки метрів міститься в одному градусі широти і довготи. Значення для меридіональних напрямків є сталим, а для паралельних – залежить від широти і може бути визначене за формулою:

$$S_x = \frac{2\pi R_E \cos(LAT)}{360}, \quad (2.10)$$

де S_x – число метрів в одному градусі довготи;

R_E – радіус Землі.

Тоді положення в X, Y метрах може бути визначено як

$$X = S_x LON_D, \quad Y = S_y LAT_D.$$

Режим автоматичного повернення на точку старту

Можна переформулювати наступним чином: При переході до цього режиму, літак встановлює бажану точку старту і розпочинає польот до неї. Алгоритми навігації в цьому режимі ґрунтуються на збереженні позиції з дрейфом, з відносно невеликими змінами [27]. На рисунку 2.18 зображена траєкторія польоту при поверненні літака до точки старту. Місця активації режиму повернення та напрямок польоту позначені стрілками.

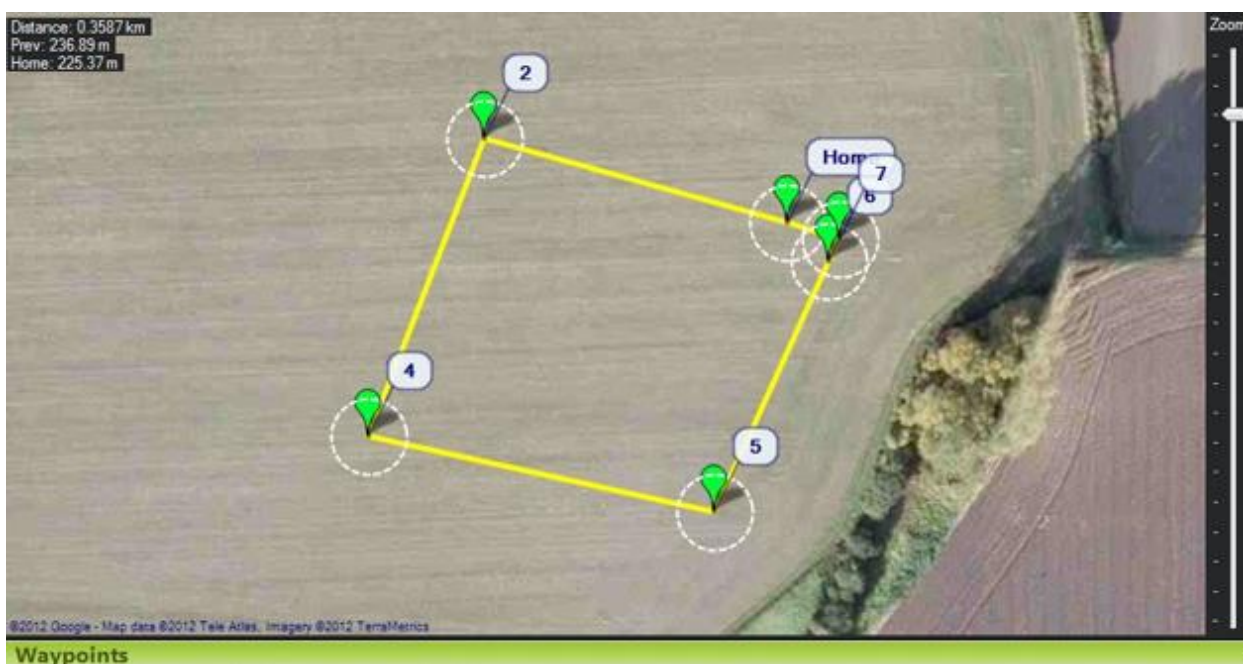


Рисунок 2.18 – Траєкторія автоматичного повернення на точку старту

Режим автоматичного польоту по точкам

Автоматичний режим польоту по точках базується на режимі польоту, що був описаний раніше. Однак в цьому режимі вдосконалено алгоритм, який полягає в автоматичному переході до наступної точки маршруту при наближенні до попередньо заданої точки на відстань, яка називається радіусом контрольної точки. На рисунку 2.19 представлений трек польоту, який був записаний на вбудовану microSD карту пам'яті та відображений у програмі Google Earth [29].

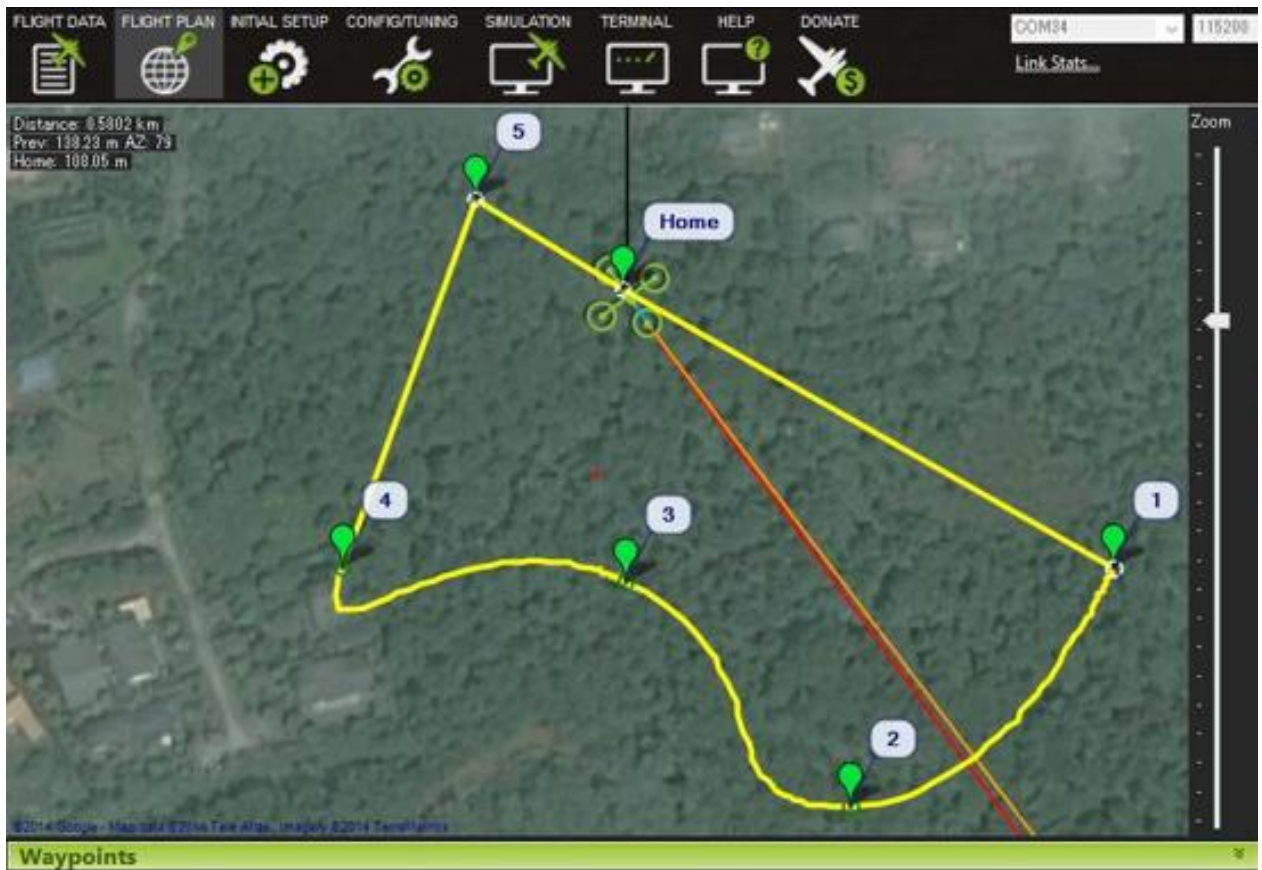


Рисунок 2.19 – Трек польоту, відображений в Google.Earth.

2.4. Висновки до розділу 2

В розділі розроблені структурно-функціональні схеми комплексу БПЛА і його системи управління, описані компоненти апарату: датчики, приймач /передатчик радіосигналів, контролери двигунів, акумулятор. Розглянуті принципи обробки інформації з датчиків квадрокоптера. Наведено алгоритм логіки управління апаратом і режими його польоту.

3 МОДЕЛЬ РУХУ В ПРОСТОРІ КВАДРОКОПТЕРА

3.1 Загальна інформація

Математична модель це система математичних співвідношень, що використовуються для опису досліджуваного процесу або явища. Такі моделі мають велике значення для багатьох наук, включаючи економіку, екологію, соціологію, фізику, хімію, механіку, інформатику, біологію та інші.

Створення математичної моделі дрона вимагає використання різноманітних джерел і методів. Загальні закони природознавства, такі як закони механіки, аеродинаміки, електродинаміки та інші, надають основу для розуміння фізичних принципів, що лежать в основі роботи дрона.

Спеціальні закони конкретних наук, наприклад, аеродинаміки, електроніки, контролю та автоматики, допомагають розробити детальніші моделі для окремих компонентів та систем дрона.

За допомогою математичних моделей можна передбачати хід процесу, розраховувати цільову функцію (вихідні параметри процесу), керувати процесом та проектувати системи з бажаними характеристиками. Для створення математичних моделей можна використовувати будь-які математичні засоби, включаючи мову диференціальних або інтегральних рівнянь, теорію множин, абстрактну алгебру, математичну логіку, теорію ймовірностей, графи та інші.

Якщо взаємозв'язки між змінними в системі можуть бути виражені аналітично, то можна знайти їх розв'язок в замкнутому вигляді або в частково замкнутому вигляді. До таких моделей відносяться диференціальні, інтегральні, різницеві рівняння, ймовірнісні моделі, моделі математичного програмування та інші. У випадках, коли точний розв'язок недосяжний, використовуються чисельні методи або інші методи моделювання.

Математичні моделі можуть бути детермінованими або стохастичними в залежності від параметрів системи та зовнішніх збурень. Детерміновані моделі пов'язані з дослідженням систем з чітко визначеними параметрами,

такими як початкові та граничні умови. Стохастичні моделі пов'язані з випадковими значеннями та є особливо важливими для дослідження та проектування складних систем зі складними взаємозв'язками та властивостями, які важко врахувати.

Для розробки математичних моделей широко використовується диференційне числення, теорія множин, матриці і графи, а також планування експерименту. Відповідно розрізняють теоретико-множинні, матричні, топологічні та поліномні математичні моделі.

Приклади математичних моделей [22]:

1. Модель Мальтуса – закон про пропорційну залежність між швидкістю росту і розміром популяції.
2. Система хижак-жертва (Вольтера-Лотки) – показує залежність між чисельністю хижаків та жертв.
3. Модель оптимальної поведінки покупця – виражає вибір покупця між множиною продуктів при обмеженому бюджеті.

Процес побудови, вивчення й використання математичних моделей називається *математичним моделюванням*. Це найзагальніший та найбільш використовуваний в науці, зокрема, в кібернетиці, метод досліджень. Це метод дослідження процесів або явищ шляхом створення їхніх математичних моделей і дослідження цих моделей. Він тісно поєднаний з такими категоріями, як абстракція, аналогія, гіпотеза тощо.

Метод математичного моделювання базується на тому, що форма рівнянь та взаємозв'язки між змінними в оригінальних рівняннях та їх моделях є ідентичними та однозначними. Зазвичай вивчення математичних моделей відбувається за допомогою аналогових або цифрових обчислювальних машин, або комп'ютерів. Застосування математичного моделювання поширене в усіх природничих та суспільних науках, які використовують математичний апарат для спрощеного опису реальності за допомогою математичних понять. Цей метод дозволяє замінити реальний об'єкт його математичною моделлю та проводити дослідження на основі цієї

моделі. Залежно від природи процесів, які вивчаються, всі види моделювання можуть бути класифіковані як аналітичні або комп'ютерні.

Для аналітичного моделювання характерним є те, що процеси функціонування елементів системи записують у вигляді деяких математичних співвідношень (алгебраїчних, інтегро-диференціальних, кінцево-різницевих тощо) чи логічних умов.

Аналітична модель може досліджуватися такими методами:

1. Аналітичним, коли прагнуть у загальному вигляді отримати деякі залежності для шуканих характеристик.
2. Числовим.
3. Якісним, коли, не маючи явного розв'язку, все ж знаходять деякі властивості рішень.

Комп'ютерне моделювання відрізняється від аналітичного моделювання тим, що математична модель системи представлена у вигляді програми та алгоритму, що можна виконувати на комп'ютері. Це дозволяє проводити чисельні експерименти з моделлю та отримувати результати. В залежності від математичного інструментарію, що використовується для побудови моделі, та способу організації обчислювальних експериментів, можна виділити три типи комп'ютерного моделювання: чисельне, алгоритмічне (імітаційне) та статистичне. Комп'ютерне моделювання застосовують у всіх науках, які використовують математичні поняття для спрощеного опису реальності.

За числового моделювання для побудови комп'ютерної моделі використовуються методи обчислювальної математики.

Алгоритмічне (імітаційне) моделювання є одним з видів комп'ютерного моделювання, яке дозволяє відтворювати процес функціонування складної системи на комп'ютері. Цей вид моделювання використовує аналітичні залежності та моделі для імітації елементарних явищ, що становлять процес, з відтворенням їхньої логічної та семантичної структури, послідовності плин у часі. Це дозволяє отримувати нову інформацію про стан системи S у

заданому моменті часу. Імітаційне моделювання може бути детермінованим або стохастичним.

Статистичне моделювання використовується для отримання статистичних даних щодо процесів в системі, яку моделюють. З розвитком математичних досліджень, виникають нові типи моделей та ознаки для їх класифікації, що ускладнює проблему класифікації. З цим пов'язаний процес інтеграції моделей різних типів у більш складні конструкції.

3.2. Розробка моделі квадрокоптера в CAD-системі SolidWorks та трансляція моделі у Simscape Multibody

У процесі проектування та створення моделі CAD-система SolidWorks дозволяє визначити параметри конструкції, що впливають безпосередньо на динаміку апарату: масу, моменти інерції, положення центру мас, тензор інерцій тощо. На рисунку 3.1 представлена модель малорозмірного квадрокоптера ZMR250, спроектована під задані у технічному завданні обмеження, для якої було виконано експорт у програмний комплекс Simscape/MATLAB Simulation.



Рисунок 3.1 – Візуалізація тривимірної моделі квадрокоптера у CAD-системі Solid Works

Пакет програмного моделювання Simscape входить до складу програмного комплексу Simulink/MATLAB та забезпечує блокове імітаційне

моделювання складних динамічних систем на основі технології візуально орієнтованого програмування. Simscape Multibody здатний взаємодіяти з іншими компонентами бібліотеки Simulink/MATLAB, таким чином збільшуючи можливості моделювання робото-технічних систем [29].

Процес моделювання динамічної системи в Simulink/MATLAB може виявитися складним через необхідність визначення деяких параметрів: моменту інерції та координати кожного пов'язаного елемента системи та ін. Для вирішення цієї проблеми компанія MathWorks розробила плагін для експорту CAD-моделей, який дозволяє створювати динамічні моделі в середовищі Simscape Multibody на основі тривимірної моделі, розробленої у системі автоматизованого проектування SolidWorks за допомогою Simscape Multibody Link.

На рисунку 3.2 представлена послідовність дій для експорту CAD-моделей, розробленої в CAD системі SolidWorks [10, 11], Simscape Multibody / MATLAB.

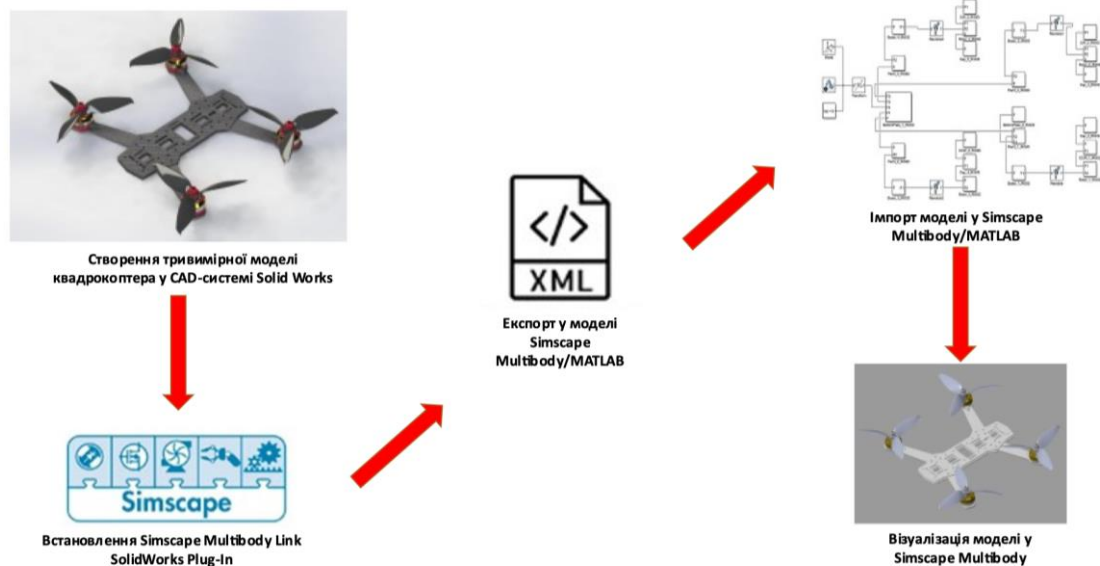
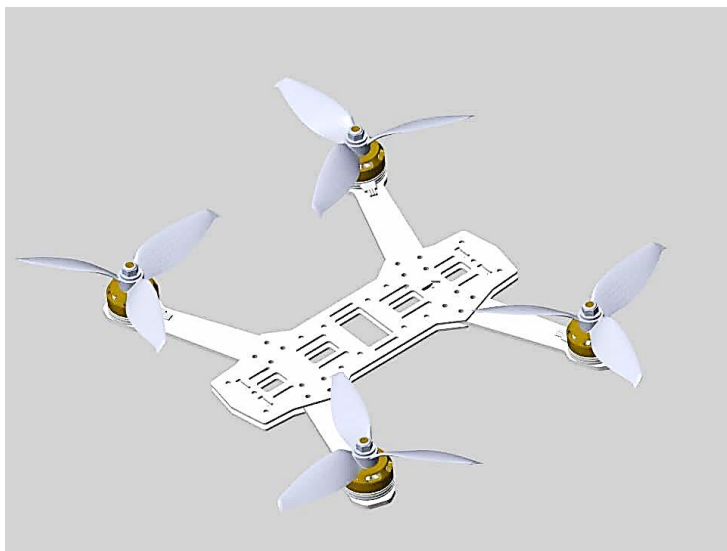


Рисунок 3.2 – Алгоритм роботи плагіна CAD експорту

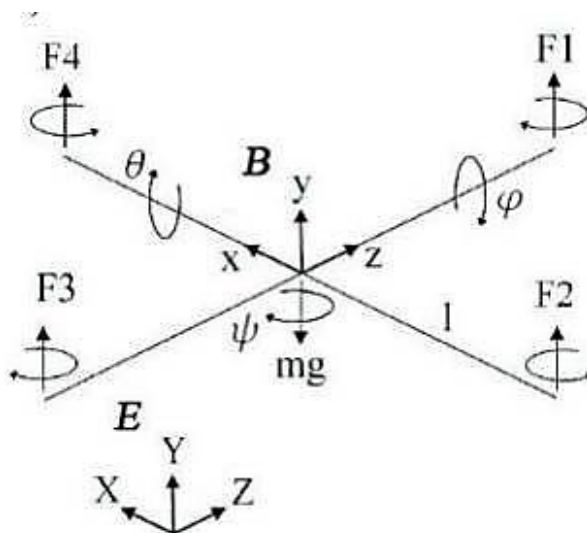
Експортована модель, розроблена в CAD-системі, у середовищі Simscape Multibody представлено на рисунку 3.5.



Риунок 3.3 – Експортована модель у Simscape Multibody

3.3. Рівняння руху квадрокоптера

Квадрокоптер є літальним апаратом з чотирма гвинтами. Його гвинти, як правило, закріплені на двох балках, які перетинаються під прямим кутом і обертаються попарно у протилежних напрямках, як показано на рисунку 3.4.



Риунок 3.4 – Кінематична схема квадрокоптера

Якщо БПЛА спроектований правильно, його центр мас перебуває у його геометричному центрі. Означимо осі земної системи координат (E) через X, Y, Z ; а осі пов'язаної системи координат (B) через x, y, z .

Квадрокоптер має шість ступенів рухливості. Його рух можна розглядати як сукупність поступального руху центру мас і обертального руху апарату щодо центру мас [18, 20]. Один із прикладів рівнянь руху для квадрокоптера представлений у [15]. Жорсткістю конструкції апарату можна знехтувати, тоді рівняння (1)-(3), що описують рух, виглядають наступним чином:

Для тіла маси m справедливий другий закон Ньютона (1):

$$m\vec{a} = -mg\vec{e}_y + R(\varphi, \theta, \psi)\vec{u} \quad (1)$$

де $\mathbf{a} = (x, y, z)^T$ – сумарне прискорення динамічної системи;

m – маса тіла;

\vec{e}_y – одиничний вектор, спрямований уздовж осі Y; $R(\varphi, \theta, \psi)$ – матриця повороту;

\mathbf{u} – сума неконсервативних сил, що діють на систему (включаючи сили лобового опору та силу тяги гвинтів).

Система диференціальних рівнянь (2) для кожного з шести ступенів свободи виглядає так:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{x} = U_1(\cos\psi \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi + \sin\psi \cdot \sin\varphi) \\ m\ddot{y} = U_1(\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \cos\psi \cdot \sin\varphi) \\ mz + mg = U_1(\cos\theta \cdot \cos\varphi) \\ \ddot{\varphi} = \dot{\theta}\dot{\varphi} \left(\frac{I_y + I_z}{I_x} \right) - \frac{J_r}{I_x} \dot{\theta}\omega + \frac{1}{I_x} U_2 \\ \ddot{\theta} = \dot{\varphi}\dot{\theta} \left(\frac{I_z + I_x}{I_y} \right) - \frac{J_r}{I_y} \dot{\varphi}\omega + \frac{1}{I_y} U_3 \\ \ddot{\psi} = \dot{\varphi}\dot{\psi} \left(\frac{I_x + I_y}{I_z} \right) - \frac{1}{I_z} U_4 \end{array} \right. \quad (2)$$

де I_x, I_y, I_z – моменти інерції тіла щодо осей x, y, z , відповідно,

J_r - момент інерції роторів;

U_i – сили, що діють на динамічну систему.

Рівняння сил (3), які діють на динамічну систему U_1, U_2, U_3, U_4 , та швидкості пропелерів ω , наведені нижче:

$$\begin{cases} U_1 = k(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ U_2 = l(\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ U_3 = l(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ U_4 = k(\omega_2^2 + \omega_4^2 - \omega_1^2 - \omega_3^2) \\ \omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 \end{cases} \quad (3)$$

3.4. Реалізація динамічної моделі БПЛА в Simscape Multibody/MATLAB

Для перевірки працездатності моделі розроблено алгоритм управління для забезпечення стабілізації кутового положення та підтримки заданої висоти польоту БПЛА типу квадрокоптер [30].

Модель, що описує БПЛА типу квадрокоптер, побудована в результаті експорту в Simscape Multibody/MATLAB шляхом використання функції CAD-транслятора представлена на рисунку 3.5.

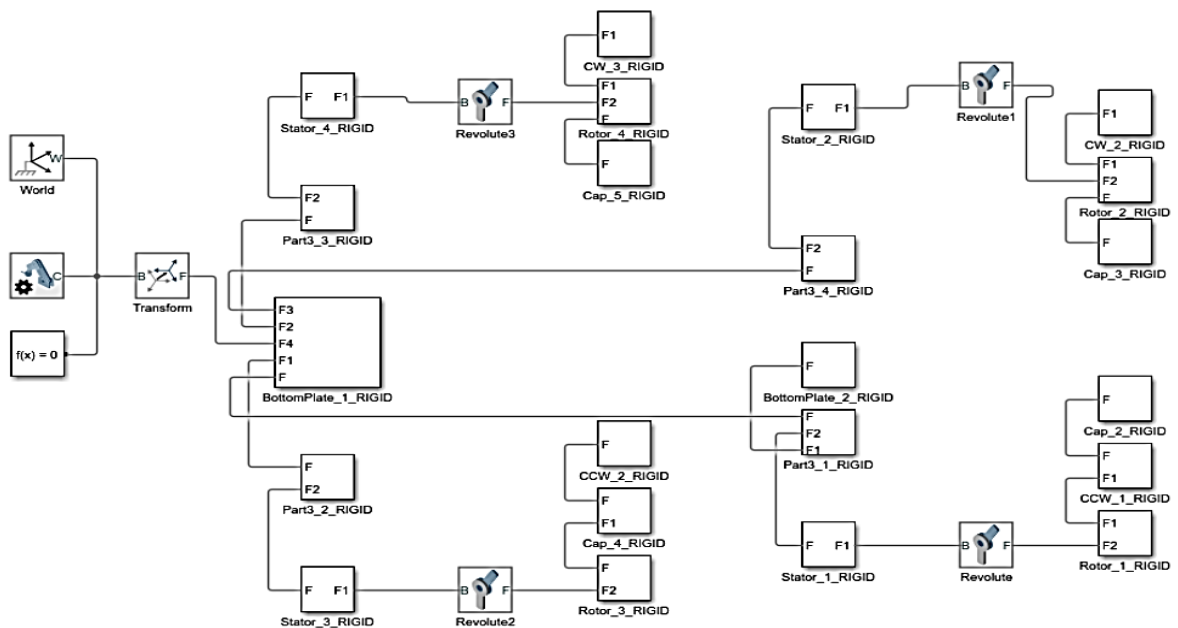


Рисунок 3.5 – Блокова схема комп'ютерної моделі БПЛА типу квадрокоптер

Отримана схема є відображенням конструктивної схеми апарату, спроектованого у SolidWorks. Маса та тензори інерції для твердих тіл,

складових модель БПЛА експортовані до Simscape Multibody/MATLAB, представлені у таблиці 1.

Таблиця 3.1– Властивості блоків «Body» корпусу квадрокоптера

Елемент	Маса (гр)	Інерція [гр*м ²]
Рама	15	$\begin{pmatrix} 0,80 & 0,59 & 0 \\ -0,59 & 0,80 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Двигун	4,5	$\begin{pmatrix} 0,00004436 & 0 & 0 \\ 0 & 0,00001046 & 0 \\ 0 & 0 & 0,00004436 \end{pmatrix}$
Пропелер	0,7	$\begin{pmatrix} -0,00906636 & 0 & 0,99995890 \\ 0,99995890 & 0 & 0,00906636 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$

Імпортована модель будь-якої динамічної системи майже завжди потребує модифікацій, таких як видалення непотрібних блоків, що описують певний тип з'єднання між елементами моделі або заміна поточних блоків на інші.

При необхідності деякі блоки можуть бути перетворені на підсистеми.

Імпортована модель враховує зв'язки, які мало впливають на кінцевий результат, а саме гвинти, гайки і т.і., так як розрахунок їх взаємодії з рамою вимагає більшого часу компіляції моделі; модифікована модель, представлена на рисунку 3.6.

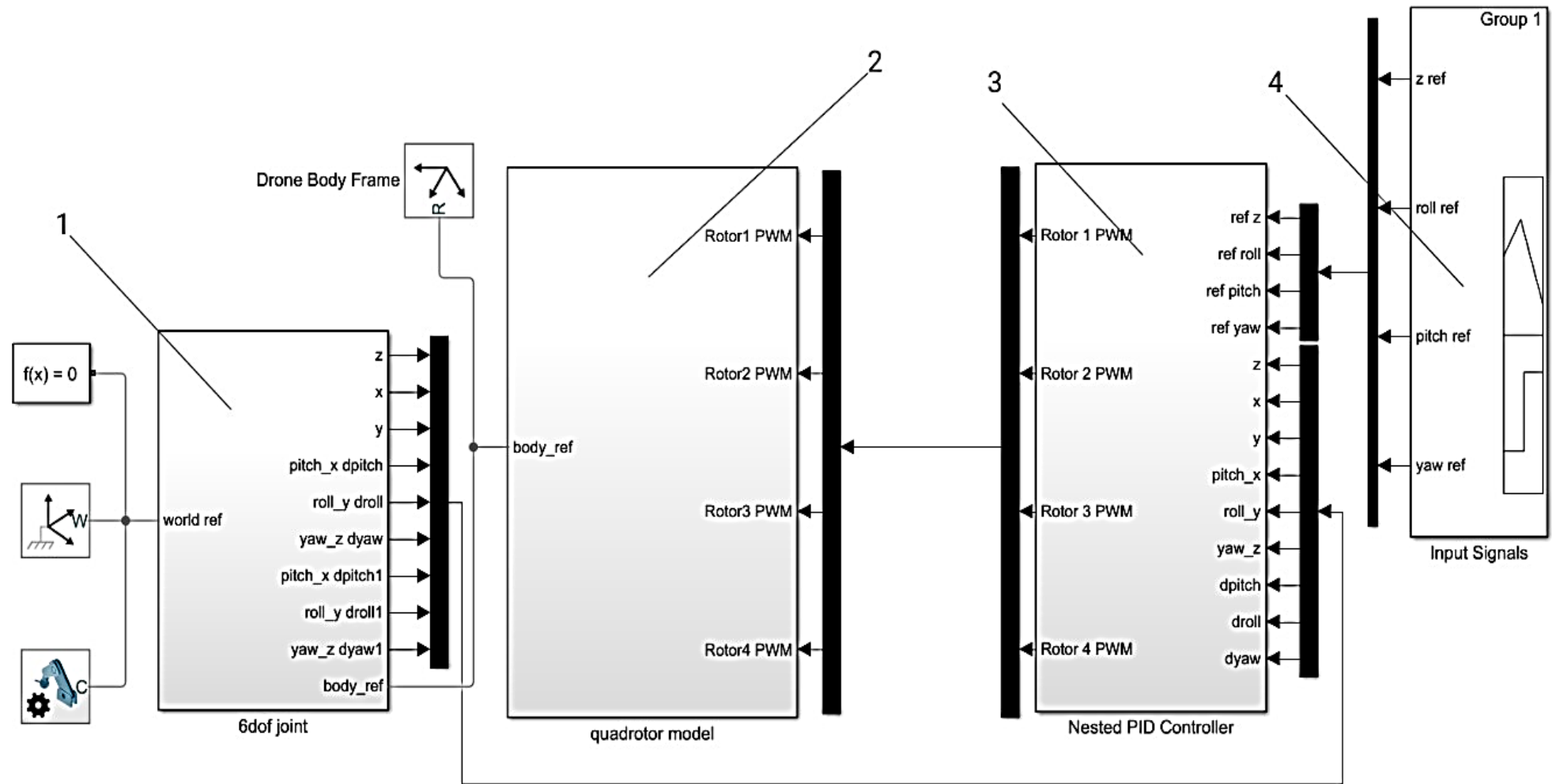


Рисунок 3.6 – Модифікована структурна схема БПЛА типу квадрокоптер

Позначення:

- 1 – підсистема, що описує поведінку квадрокоптера у земній системі координат; 2 – підсистема, що описує рухову установку; 3 – система керування квадрокоптера; 4 – система, що моделює вхідний вплив.

Перша підсистема (рисунку 3.7) призначена для числення та відображення положення квадрокоптера в земній системі координат залежно від сигналів управління, що надійшли на гвинто-моторну групу апарату.

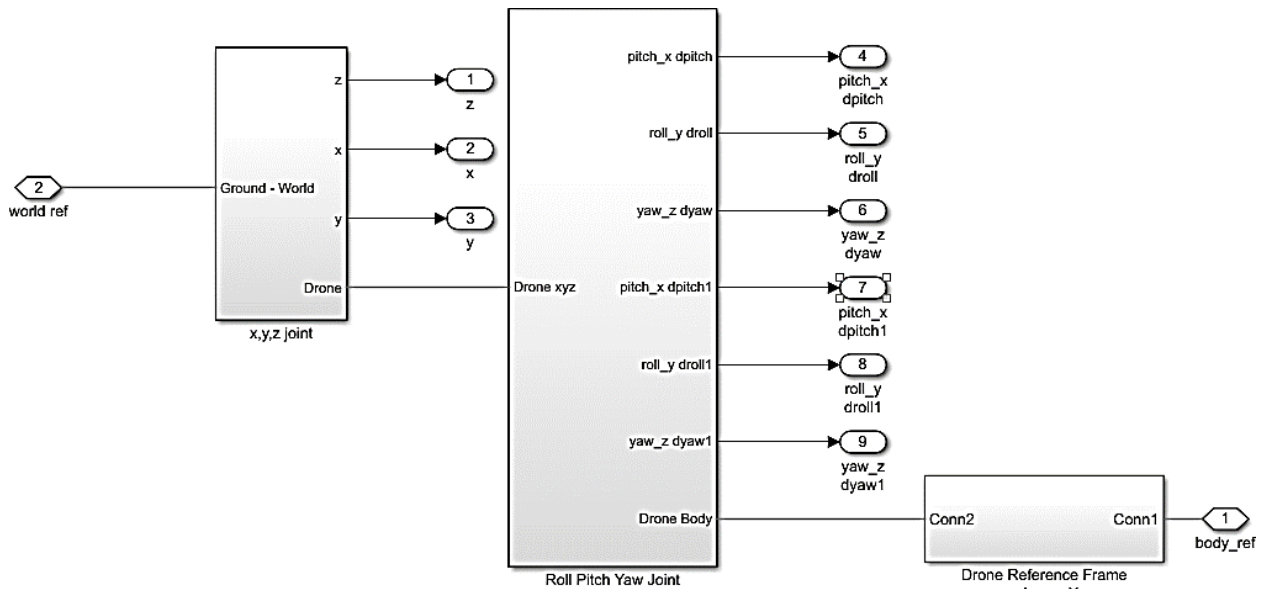


Рисунок 3.7 – Внутрішня структура підсистеми, що описує взаємодію рами квадрокоптера із земною системою координат

У цій підсистемі вихідні значення блоку «X, Y, Z joint» – x , y , z являють собою переміщення по осях x , y і z . Вихідні значення блоку *Roll Pitch Yaw Joint*:

$pitch_xdpitch$ – кут тангажу,

$roll_ydroll$ – кут крену,

yaw_zdyaw – кут ристання,

$pitch_xdpitch1$ – кутова швидкість тангажу,

$roll_ydroll1$ – кутова швидкість крену;

yaw_zdyaw1 – кутова швидкість ристання.

Друга підсистема моделює функціонування гвинтомоторної групи залежно від ШІМ (PWM) – сигналу, що надходить на регулятори оборотів, її структура показана на рисунку 3.8, на якому використані позначення [32]:

підсистема Body – основна рама, куди кріпляться двигуни квадрокоптера,
 підсистема Rotor – ротори електродвигунів,
 блоки Thrust and Rotation – блоки перетворення ШІМ сигналу тягу та кутову швидкість обертання ротора.

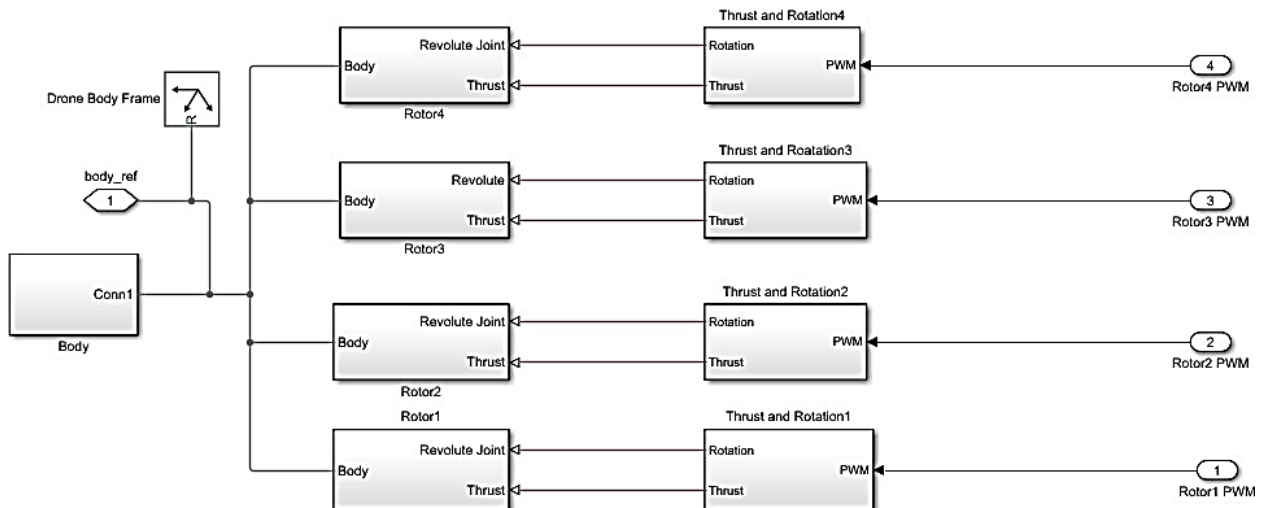


Рисунок 3.8 – Внутрішня структура підсистеми, що описує роботу гвинтомоторної групи

Для схеми «квадрокоптер» характерно різноспрямоване обертання гвинтів, що знаходяться на одній осі. Для моделювання зворотного обертання двигунів необхідно інвертувати сигнал після ланки інтегратора. Структурна схема управління одиничним двигуном під час керування через ШІМ (PWM) представлена рисунку 3.9.

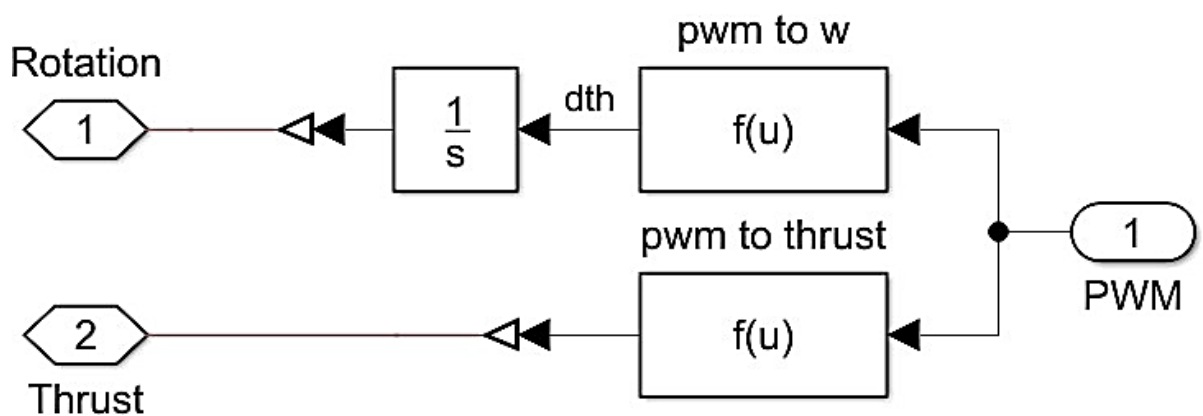


Рисунок 3.9 – Структурна схема перетворення сигналу ШІМ на кількість обертів та тягу двигунів

Третя підсистема визначає систему управління кутовим положенням та висотою польоту апарату (рис. 3.10).

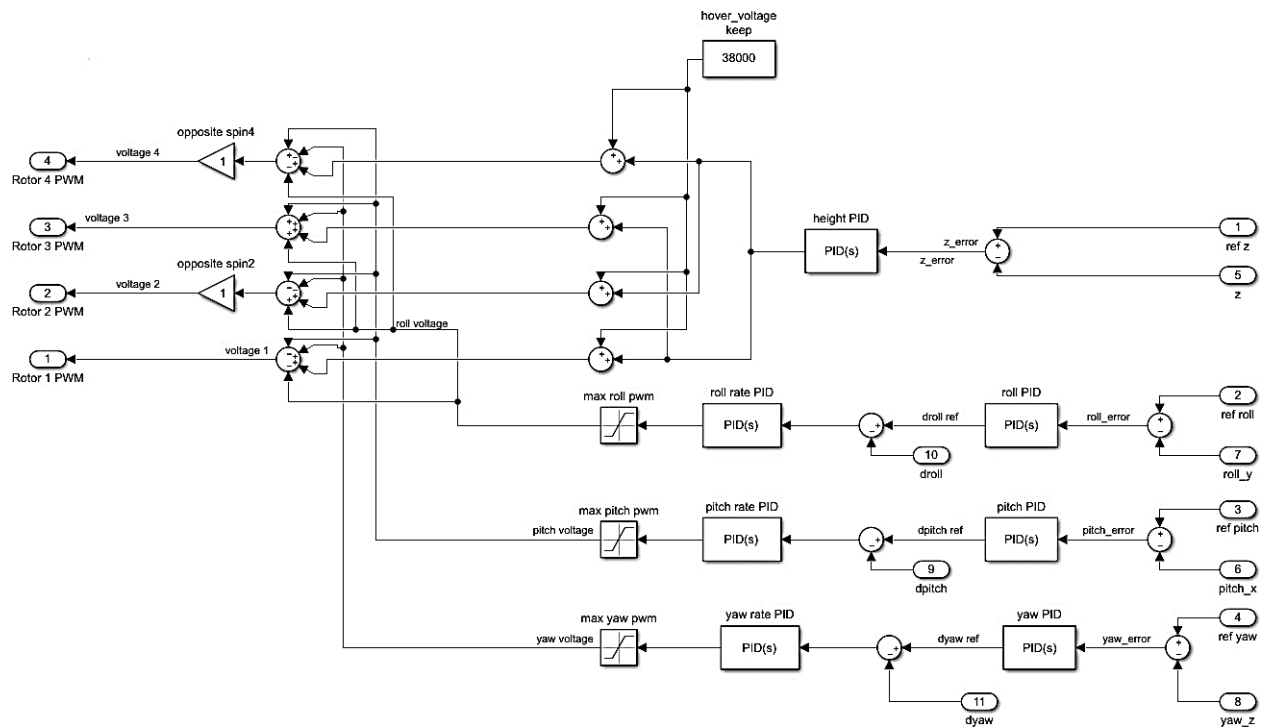


Рисунок 3.10 – Внутрішня структура підсистеми, що описує процес управління

3.5. Результати моделювання

Для валідації цифрової моделі системи управління було побудовано квадрокоптер, на польотний контролер якого був інтегрований код, що описує синтезовану (комп'ютерну) модель системи керування апаратом [31]. На рисунках 3.11-3.14 представлені графіки перехідних процесів, отримані при порівняльних випробуваннях комп'ютерної моделі та у процесі польоту реального квадрокоптера. Позначення на малюнках (тут і далі):

пунктирна лінія – необхідне значення,

суцільна лінія – перехідний процес.

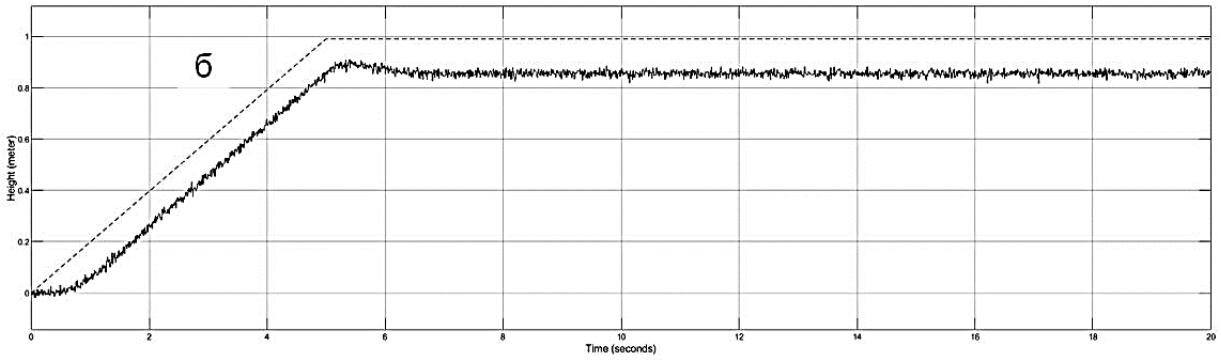
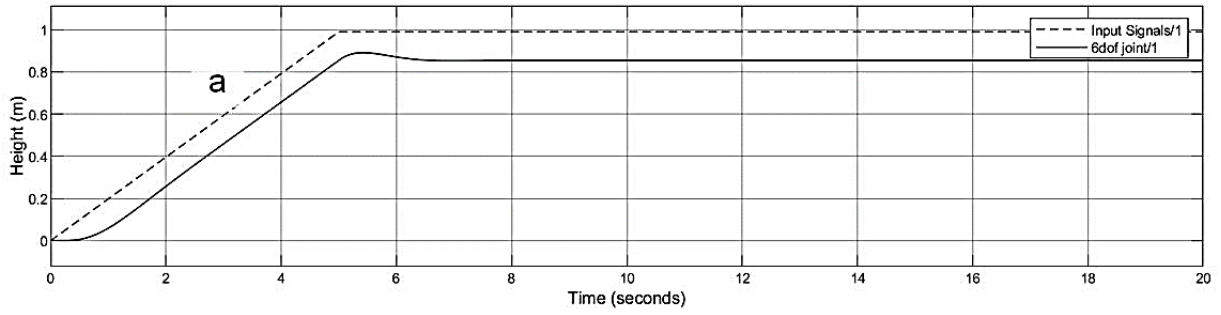


Рисунок 3.11 – Графік перехідного процесу за висотою польоту:
а – результати моделювання, б – натурні випробування

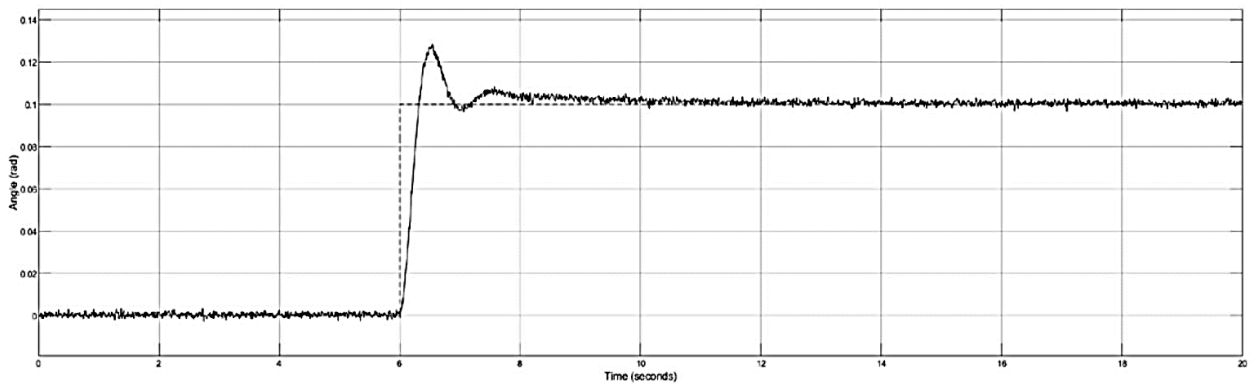
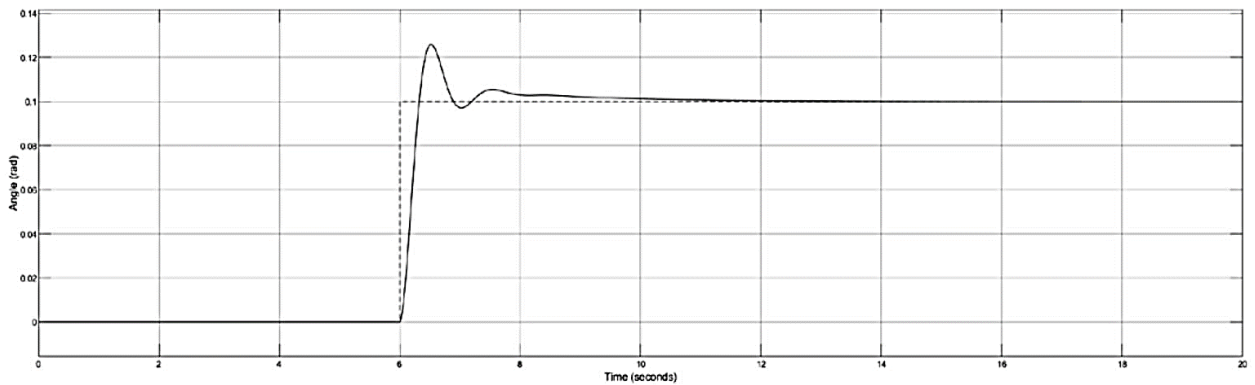


Рисунок 3.12 – Графік перехідного процесу за кутом тангажу – θ :
а – результати моделювання, б – натурні випробування

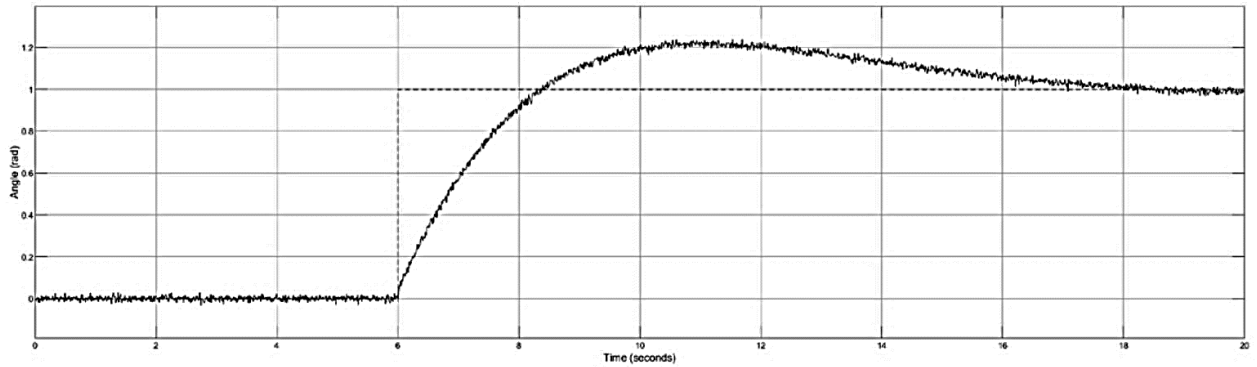
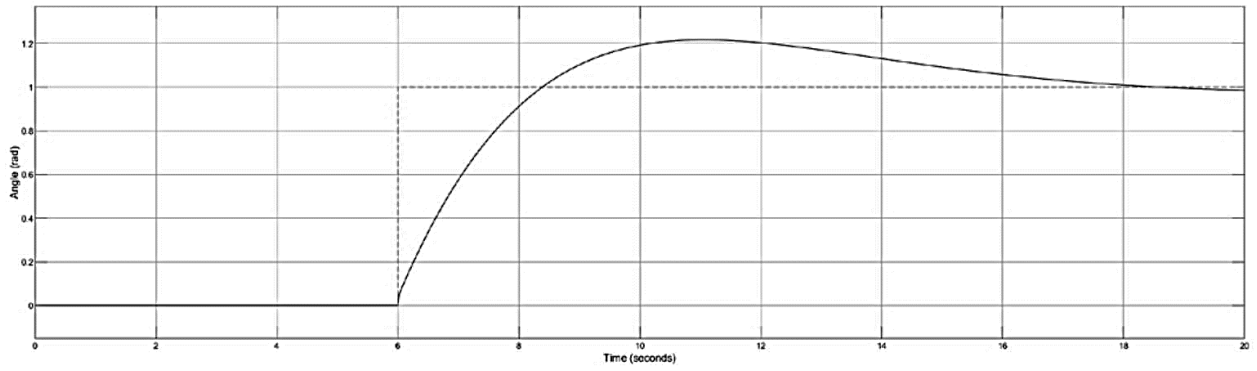


Рисунок 3.13 – Графік перехідного процесу за кутом курсу – ψ :
а – результати моделювання, б – натурні випробування

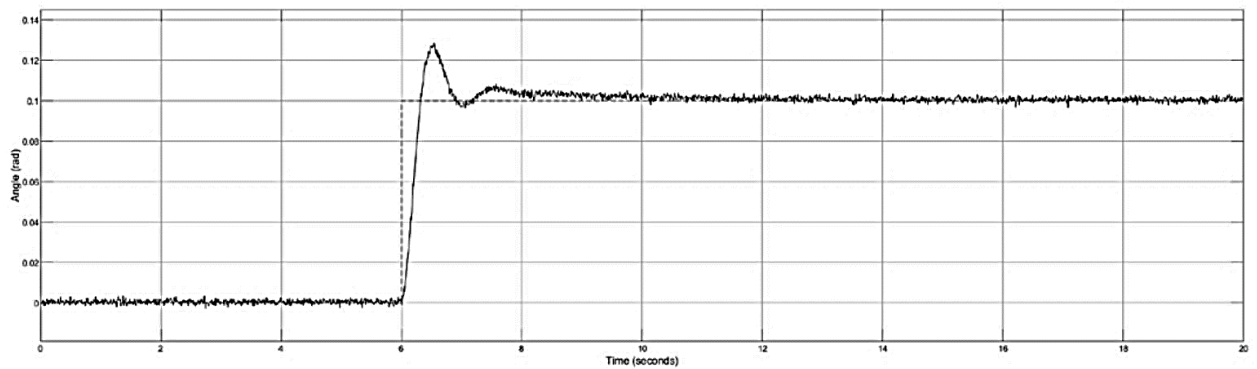
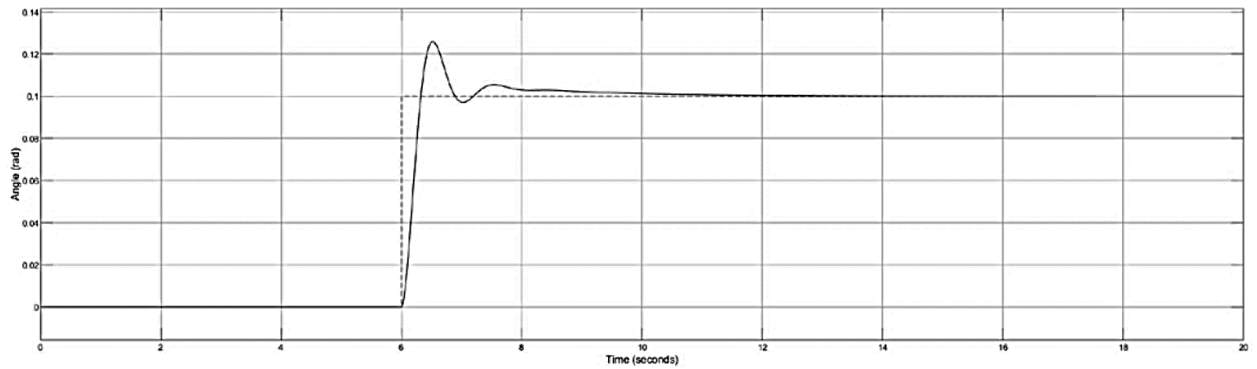


Рисунок 3.14 – Графік перехідного процесу по куту крену – ϕ :
а – результати моделювання, б – натурні випробування

3.6. Висновки до розділу

Подано безпілотний літальний апарат типу «квадрокоптер» на ранніх стадіях проектування з використанням програмних пакетів SolidWorks та Simulink/MATLAB. Спроектвана модель в середовищі Simulink/MATLAB дозволяє проводити оцінку систем стабілізації і систем управління літальним апаратом для БПЛА, виконаного за аеродинамічною схемою «квадрокоптер» без запуску самого квадрокоптера.

Описано підхід до комп'ютерного моделювання безпілотного літального апарату (БПЛА) типу квадрокоптер шляхом інтеграції програмних пакетів SolidWorks та SimMechanics/MATLAB. Розроблено динамічну модель БПЛА

типу квадрокоптер на основі методу візуально-орієнтованого програмування у середовищі SimMechanics та алгоритм управління БПЛА типу квадрокоптер, що забезпечує об'єкту необхідну стабілізацію та можливість зависати на заданій висоті, у тому числі під впливом горизонтальних повітряних потоків. Динамічна модель БПЛА типу квадрокоптер досить чутлива до зовнішніх факторів.

У порівнянні з традиційним підходом моделювання середовище SimMechanics має ряд переваг: простоту побудови та параметрування моделі, швидкість налагодження, гнучкі інструменти вимірювання та візуалізації.

Розбіжність результатів комп'ютерної моделі з натурними випробуваннями за точністю становить 2,3% для кута тангажу, 2,5% для кута крену, 6,7% для кута ристання і 3,7% за висотою. Отримано високу точність відповідності моделей, це доводить можливість застосування представленого підходу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Загальний опис приміщення та аналіз умов праці в ньому

Під час проходження практики в Миколаївському обласному Центрі науково-технічної творчості учнівської молоді, студент, який отримує диплом, працював в лабораторії з судномодельовання. За час своєї практики він займався розробкою системи управління та руху безпілотного літального апарату (квадрокоптера). Під час роботи в лабораторії виконувалися певні правила, включаючи наступне:

- На робочому місці не слід залишати без нагляду будь-які нагрівальні прилади, такі як паяльники, газові горілки, фени та пальники.
- Заборонено застосовувати та зберігати речовини, властивості яких не досліджені. Це може становити ризик для здоров'я та безпеки інших осіб.
- Заборонено виливати в каналізаційну трубу будь-які легкозаймисті та горючі рідини або речовини, походження яких невідоме.
- Необхідно наглядати за ввімкненими в мережу електроприладами та не залишати їх без нагляду.
- Робота з пристроями, приладами та механізмами, які належать до категорії електрообладнання, може проводитись тільки відповідно до чинних нормативних документів та за підтримки викладача.

Збереження структури приміщення, де проводилась розробка, відповідало вимогам охорони праці. Під час розробки системи керування були використані різні технології та виконано різноманітні технічні завдання. При роботі можна було стикнутись з різними небезпечними факторами, такими як:

- лазерне випромінювання при 3D друці (пряме, розсіяне, видиме) [1];
- робота з електричною напругою 220/380В;
- наявність незахищених рухомих елементів виробничого обладнання;

- наявність гострих кромek, задирок та шорсткості на поверхнях обладнання та інструментів;
- електричні та магнітні поля;
- підвищена напруга в електричному ланцюзі. Розглянемо деякі конкретні фактори умов праці в обраному виробничому приміщенні та методи запобігання їх негативного впливу на функціональний стан організму людини [3].

Лазер – це пристрій, який генерує електромагнітне випромінювання в оптичному діапазоні шляхом використання вимушеного випромінювання. Залежно від їх конструкції, лазери можуть бути твердотільними (на кристалах або склах), газовими, на барвниках, хімічними, напівпровідниковими та іншими.

Обслуговуючий персонал повинен бути обізнаний щодо ступеня небезпеки лазерного випромінювання, і тому лазери класифікуються на чотири класи.

1. Клас I є безпечним, оскільки вихідне випромінювання не є шкідливим для очей.
2. Клас II є малонебезпечним, оскільки пряме або відбите випромінювання може бути небезпечним для очей.
3. Клас III є середньо-небезпечним, оскільки пряме, відбите або дифузне випромінювання на відстані 10 см від поверхні, що відбиває, може бути небезпечним для очей та шкіри.
4. Клас IV є високонебезпечним, оскільки дифузне випромінювання на відстані 10 см від поверхні, що відбиває, може бути небезпечним для шкіри.

Електрична енергія є одним із видів енергії, який існує у формі потенціальної енергії електричного та магнітного поля, а також енергії електричного струму. Завдяки своїй зручній технології виробництва, розподілу та споживанню, електрична енергія є одним з провідних джерел енергії для людства.

Проте, від ураження електричним струмом щороку гинуть понад тисячу людей. Тому важливо дотримуватися правил техніки безпеки та завжди уважно читати інструкції виробників для всіх електричних пристроїв та інструментів.

Ступінь ураження людини від електричного струму залежить від кількох факторів, таких як величина струму, який проходить через життєво важливі органи, рід та частота струму, тривалість його дії, шлях проходження струму в тілі людини та індивідуальні особливості кожної людини.

У роботі з електромережею необхідно враховувати, що величина струму та тривалість його дії є ключовими факторами впливу на людину. З метою забезпечення безпеки, важливо відомо про такі значення струму:

- безпечним є струм, який не перевищує 50 мкА і не викликає жодних відчуттів;
- граничний відчутний струм становить 0,5-1,5 мА, його вплив відчувається у вигляді легкого поколювання та відчуття нагріву шкіри;
- струм від 2 до 5 мА може спричинити біль у руці та тремтіння кисті.
- нестерпний біль і повне припинення управління м'язами - це наслідки збільшення струму до 10-15 мА. Якщо людина лише доторкнулася до ділянок під напругою, то може вилучити свою руку та звільнитися від дії струму. Але, якщо дрiт затиснувся в руці, то при цьому значенні струму людина не зможе розтиснути пальці від струмоведучих частин, залишаючись під напругою. Таке явище пояснюється тим, що згинальні м'язи створюють більше зусилля, ніж розгинальні, тому при проходженні струму однієї і тієї ж величини по руці, пальці стискаються в кулак. При значенні струму до 10-15 мА вплив біологічних імпульсів з волі людини ще може створити більше зусилля в розгинальних м'язах, тому потерпілий може звільнитися від дії струму. Але при більшому струмі вплив

біологічних імпульсів на управління м'язами повністю втрачається, і м'язи скорочуються тільки дією зовнішнього струму. Неминучий пороговий струм безпечний у тому сенсі, що не викликає негайної поразки, але при тривалому проходженні величина струму зростає, що може призвести до порушення кровообігу та дихання, і навіть до смерті. Тому, при роботі з електромережею, необхідно враховувати величину струму та тривалість його протікання, щоб уникнути можливих наслідків для людини.

- при струмі приблизно 50 мА відбувається скорочення м'язів грудної клітки, звуження кровеносних судин та підвищення артеріального тиску, що може призвести до втрати свідомості та смерті.
- якщо струм проходить через тіло людини понад 100 мА по шляху рука-рука або рука-нога, то через 1-2 секунди може виникнути фібриляція серця, коли окремі волокна серцевого м'яза починають скорочуватися хаотично та розрізнятися одне від одного. Це призводить до того, що серце перестає працювати як насос, кровообіг порушується, а фібриляція може продовжуватися після припинення дії струму, що може призвести до смерті.
- при струмі понад 5 А, фібриляція серця зазвичай не відбувається, а замість цього може настати негайна зупинка серця. Незважаючи на те, що було відомо багато випадків, коли людина пережила короткочасний прохід струму величиною близько 10 А, у цьому випадку може виникнути параліз дихання. При великих токах, що пройшли через тіло людини, смерть може настати в результаті руйнування внутрішніх тканин організму та глибоких опіків тіла.
- при напрузі до 250-300 В, постійний струм є приблизно в 4-5 разів менш небезпечним, ніж змінний струм з частотою 50 Гц. Однак, при вищих напругах, постійний струм може бути небезпечнішим за змінний.

- опір тіла людини залежить від стану її шкіри. Звичайно, опір коливається в межах від 3000 до 500 000 Ом, якщо шкіра суха, чиста і неушкоджена. Однак, якщо роговий шар шкіри видалити в місцях, де проводиться вимірювання опору, то його значення знижується до 500-700 Ом. В цілому, стан шкіри має значний вплив на величину опору тіла людини.

Проаналізуємо стан пожежної безпеки в приміщенні, де проводиться розробка системи управління та руху квадрокоптера. Згідно з вимогами ДБН В.1.1.7-2002 [5] та НАПБ Б.03.002-2007 [6], досліджуване приміщення відноситься до категорії Д за вибухопожежною та пожежною небезпекою, оскільки в ньому зберігаються негорючі речовини, а можливі класи пожежі – А, Е, через наявність паперу, текстилю, деревини та обчислювальної техніки.

Для забезпечення пожежної безпеки використовується комплекс заходів, який включає такі системи:

1. Систему запобігання пожежі;
2. Систему протипожежного захисту;
3. Комплекс організаційно-технічних заходів для забезпечення пожежної безпеки.

Для запобігання виникненню джерел запалювання в займистому середовищі використовуються наступні методи:

- правильна експлуатація обладнання;
- використання безпечного електрообладнання;
- контроль максимального нагріву поверхонь та горючих матеріалів;
- використання інструменту без іскр;
- блискавкозахист;
- усунення контакту з повітрям та інші.

4.2. Система протипожежного захисту

Щоб запобігти пожежам, необхідно припинити доступ повітря до палаючого предмету, видалити палаючу речовину з зони горіння або знизити температуру. Зазвичай, для гасіння пожеж використовують комбінацію цих методів, застосовуючи різноманітні засоби гасіння. Найпоширенішим серед них є вода, але в деяких випадках вона може бути непридатною для гасіння, наприклад, коли горять рідини з меншою питомою щільністю, водоїмких речовин, у разі можливості ураження електрострумом або якщо збиток від води перевищує збитки від вогню. У таких випадках можуть використовуватись інші засоби гасіння, такі як пісок, хімічні вогнегасники, що діють піною, сухий хімічний порошок або вуглекисла кислота.

Різноманітність устаткування, яке використовується для гасіння пожеж, дуже велика. Віддають перевагу порошковим і вуглекислотним вогнегасникам, оскільки найбільш поширеним джерелом пожеж у приміщенні є погане поводження з електроенергією. Для забезпечення безпеки на підприємстві проводять організаційні та технічні заходи, такі як інструктажі з пожежної безпеки, навчання евакуації в разі пожежі та навчання техніці безпеки, як використовувати вогнегасники та тушити вогонь [7]. Одним із важливих аспектів є забезпечення якості повітряного середовища у приміщенні, де розробляється система управління та руху квадрокоптера. Факторами, які можуть впливати на якість повітря, є газоподібні та пилові випари, що утворюються під час спаювання радіодеталей, слюсарної обробки та 3D друку. Тому необхідно обладнати виробниче приміщення системою вентиляції.

4.3. Цивільний захист

План евакуації з приміщення Миколаївський обласний центр науково-технічної творчості учнівської молоді

1. Проведіть огляд приміщення та визначте всі евакуаційні виходи, зокрема виходи через вікна та двері.
2. Завчасно складіть плани евакуації та надайте їх усім працівникам та учням центру.
3. Проведіть інструктаж працівників та учнів щодо процедури евакуації та процедури повідомлення про надзвичайну ситуацію.
4. Встановіть систему попередження, яка повідомлятиме про надзвичайні ситуації та промовлятиме інструкції щодо евакуації.
5. Встановіть систему автоматичного сповіщення служб рятувальної служби про надзвичайну ситуацію, щоб забезпечити швидкий реагування.
6. Забезпечте належну освітленість вздовж всіх евакуаційних шляхів та виходів.
7. Завчасно плануйте евакуацію для дітей з особливими потребами та людей з обмеженими можливостями.
8. Перевірте наявність пожежних вимикачів та вогнегасників, та переконайтеся, що вони в робочому стані.
9. Встановіть додаткові двері, якщо це необхідно, для забезпечення безпеки та ефективної евакуації.
10. Забезпечте наявність аптечок першої допомоги на кожному поверсі та підготуйте персонал для їх використання в надзвичайних ситуаціях.
11. Зберігайте документи, які можуть знадобитися під час евакуації, у легкодоступному місці, щоб забезпечити їх безпечне вивезення.

- 12.Перевірте наявність належної освітленості та інших засобів безпеки у підвалі, а також проведіть перевірку на наявність пожежонебезпечних матеріалів та можливості їх поширення в разі загорання.
- 13.Перевірте наявність належної освітленості та інших засобів безпеки на даху приміщення, якщо це може стати необхідним під час евакуації.
- 14.Забезпечте наявність рушників та інших засобів гігієни для учнів, які можуть їх потребувати під час евакуації.
- 15.Забезпечте наявність протиотруйних засобів та масок для дихання для персоналу та учнів, які можуть їх потребувати під час евакуації.
- 16.Перевірте наявність засобів зв'язку та електроживлення в евакуаційних виходах, щоб забезпечити зв'язок зі службами рятувальників у надзвичайних ситуаціях.
- 17.Перевірте наявність джерел води та інших засобів забезпечення безпеки в разі перебоїв у водопостачанні чи електропостачанні.
- 18.Встановіть систему збору інформації про учнів, персонал та гостей приміщення, щоб у разі евакуації була можливість швидко перевірити їх присутність та безпеку.
- 19.Проведіть тренування з евакуації для персоналу та учнів приміщення, щоб підготувати їх до дій у надзвичайній ситуації.
- 20.Періодично перевіряйте стан евакуаційних шляхів та виходів, а також засобів безпеки, щоб забезпечити їх належне функціонування та готовність до використання у разі надзвичайної ситуації.

4.4. Висновки до розділу 4

Під час роботи в Миколаївському обласному Центрі науково-технічної творчості учнівської молоді, мав нагоду працювати в лабораторії з судномодельовання, де займався розробкою системи управління та руху безпілотного літального апарату, зокрема квадрокоптера. Цей досвід дав можливість отримати практичний досвід у сфері моделювання та керування дронами.

Представлено вимоги безпеки нормативно-правових документів щодо роботи з друком на 3D DLP принтері, слюсарним обладнанням, електрикою.

Для ефективного запобігання пожежам і їх гасіння необхідно використовувати поєднання методів, таких як припинення доступу повітря до палаючого предмету, видалення палаючої речовини з зони горіння або зниження температури. Важливо розуміти, що різні ситуації можуть вимагати різних підходів до гасіння пожежі, і застосування різноманітних засобів гасіння, які є найбільш ефективним.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання випускної наукової роботи магістра була спроектована система управління безпілотним літаючим апаратом (квадрокоптером), яка забезпечує високу ефективність та керованість. На сьогоднішній день застосування квадрокоптера є перспективним напрямком.

1. Розглянуті різні методи, які можна застосувати до аналізу динаміки польоту квадрокоптера. Подано безпілотний літальний апарат типу «квадрокоптер» на ранніх стадіях проектування з використанням програмних пакетів SolidWorks та Simulink/MATLAB. Спроектована модель в середовищі Simulink/MATLAB дозволяє проводити оцінку систем стабілізації і систем управління літальним апаратом для БПЛА, виконаного за аеродинамічною схемою «квадрокоптер» без запуску самого квадрокоптера.

2. Описано підхід до комп'ютерного моделювання безпілотного літального апарату (БПЛА) типу квадрокоптер шляхом інтеграції програмних пакетів SolidWorks та SimMechanics/MATLAB. Розроблено динамічну модель БПЛА типу квадрокоптер на основі методу візуально-орієнтованого програмування у середовищі SimMechanics та алгоритм управління БПЛА типу квадрокоптер, що забезпечує об'єкту необхідну стабілізацію та можливість зависати на заданій висоті, у тому числі під впливом горизонтальних повітряних потоків. Динамічна модель БПЛА типу квадрокоптер досить чутлива до зовнішніх факторів.

3. Дослідження та аналіз моделей показав, що у порівнянні з традиційним підходом моделювання середовище SimMechanics має ряд переваг: простоту побудови та параметрування моделі, швидкість налагодження, гнучкі інструменти вимірювання та візуалізації.

Розбіжність результатів комп'ютерної моделі з натурними випробуваннями за точністю становить 2,3% для кута тангажу, 2,5% для

кута крену, 6,7% для кута рискання і 3,7% за висотою. Отримано високу точність відповідності моделей, це доводить можливість застосування представленого підходу.

4. Проведені дослідження підтверджують придатність зазначених підходів до дослідження динаміки польоту безпілотного літаючого апарату (квадрокоптера) з перспективою їх вдосконалення.

5. Представлено вимоги безпеки нормативно-правових документів щодо роботи з друком на 3D DLP принтері, слюсарним обладнанням, електрикою.

6. Можна підвести підсумок, що безпілотні літальні апарати (квадрокоптери) є невід'ємною частиною робототехніки, як найвищого рівня автоматизації. Як факт, на продуктивність і на якість роботи БПЛА впливає його система автоматизації, а саме алгоритми управління і точність контрольно-вимірювальних приладів.

Результати роботи апробовані на XXV Всеукраїнській науково-практичній конференції «Могилянські читання – 2022» та XVII Міжнародній науковій конференції «Ольвійський форум-2023».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ, ПОСИЛАННЯ

1. Богословський С. В., Дорофєєв А. Д. Динаміка польоту літальних апаратів: Навч. посібник / СПбГУАП. СПб., 2002. 64 с.
2. Бородіч П. Ю., Безуглов О. Є. Оцінка показників вентиляції для робіт різного ступеня важкості. – 2011. 85 с.
3. «Все про 3D-сканери: від різновидів до застосування» – URL: <http://can-touch.com/blog/vse-o-3d-skanerax/> (дата звернення 10.11.2022)
4. Гривюк О. Технології 3D сканування // Інформаційно-комп'ютерні технології – 2018. – №. 9. – С. 242-245.
5. Громов, А.А. Керування багатокоптерними системами на основі комп'ютерного моделювання: навчальний посібник. - Київ: Видавництво "Логос", 2021. 216 с.
6. ДБН В.1.1.7-2002. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. – URL: https://dnaop.com/html/3608/doc-ДБН_В.1.1.7-2002 (дата звернення 10.05.2023)
7. Жеребко О. І., Гриценко О. В. Моделювання і керування квадрокоптерами. – Київ: Вид-во КПУ. 2019, 75 с.
8. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Мельников О. В. Основи охорони праці // Львів: Афіша. – 2000. – Т. 350. – С. 132-136.
9. Класифікація безпілотних літальних апаратів / О. І.Тимочко, Д. Ю. Голубничий, В. Ф. Третяк, І. В. Рубан. // Системи озброєння і військова техніка. – 2007. – №1. – С. 61–66.
10. Моделювання процесу керування вертикальним злетом і приземленням безпілотного квадрокоптера / Б. Благітко, Ю. Мочульський, Л. Кіт, І. Заячук // Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології. – 2012. – Вип. 16. – С. 23-31.
11. Моделювання процесу стабілізації та керуваності безпілотного квадрокоптера у польоті / Б. Благітко, Ю. Мочульський, Л. Кіт, І.

- Заячук // Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології. – 2013. – Вип. 18. – С. 21-31.
12. Мочульський Ю. MatLab у фізичних дослідженнях:[навч. - метод. посіб.] / Ю. Мочульський — Львів: ВЦ ЛНУ ім. Івана Франка, 2004. – 121 с.
13. НАПБ Б.03.002-2007. Нормы определения категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. – URL: https://dnaop.com/html/doc-НАПБ_Б.03.002-2007 (дата звернення 11.05.2023)
14. Обзор гексакоптера YUNEEC Typhoon H: репортажи с высоты 4K//Geeksus. – 2018. – URL: <https://geeksus.ru/obzory/obzor-geksakoptera-yuneeec-typhoon-h-reportazhi-s-vysoty-4k/>.(дата звернення 11.11.2022)
15. Основы побудови бесплатформенной інерційних систем / В.В.Матвеев, В.Я.Располов – СПб .: ГНЦ РФ ВАТ «Концерн» ЦНДІ «Электроприлад», 2009. – 280 с.
16. Офіційний сайт представник Ardupilot. Контролери Ardupilot.2012. URL: <http://ardupilot.com/>, вільний (дата звернення 15.12.2022)
17. Офіційний сайт представник симулятора X–Plane. [Електронний ресурс], містить базу знань про симуляторі X–Plane. URL: <http://www.x-plane.com>, вільний. (дата звернення 10.03.2023)
18. Офіційний сайт представник симулятора FlightGear. [Електронний ресурс], містить базу знань про симуляторі FlightGear. URL: <https://www.flightgear.org> (дата звернення 15.03.2023)
19. Петин В. А. Проекты с использованием протокола Arduino. 2 изд. - БХВ-Петербург, 2015.120 с.
20. Розробка керуючих програм промислових роботів / А.С. Климчик Р.І. Гомолицкий Ф.В. Фурман К.І. Сьомкін – Курс лекцій для студентів. Лекція 1. – URL: <http://docplayer.ru/101149-Razrabotka->

- [upravlyayushchih-programm-promyshlennyh-robotov.html](http://docplayer.ru/101150-Razrabotka-upravlyayushchih-programm-promyshlennyh-robotov.html) (дата звернення 12.12.2022)
21. Розробка керуючих програм промислових роботів / А.С. Климчик Р.І. Гомолицкий Ф.В. Фурман К.І. Сьомкін – Курс лекцій для студентів. Лекція 2. – URL: <http://docplayer.ru/101150-Razrabotka-upravlyayushchih-programm-promyshlennyh-robotov.html> (дата звернення 14.12.2022)
22. Самарський А.А., Гулін А.В. Чисельні методи: Учеб. посібник для вузів. – М.: Наука. Гл. ред. фіз-мат. лит., 1989. – 432 с.
23. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика. Учебное пособие / В. А. Ананьев, Л. Н. Балужева, А. Д. Гальперин и др. – М.: «Евроклимат», издательство «Арина», 2000. – 416 с.
24. Система управління БПЛА для польоту на малих висотах / Т.В. Білоцерківський – Національний технічний університет України. – URL: <http://masters.donntu.org/2013/fkita/perebeinos/library/article6.htm> (дата звернення 08.02.2023)
25. Теорія автоматичного керування: класика і сучасність: підруч. / Н. Б. Репнікова. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 328 с.
26. Ampersant [Електронний ресурс]: Ультразвуковий далекомір – URL: <http://www.ampersant.com/ultra/> (дата звернення 14..01.2023)
27. An Introduction to the Kalman Filter – Greg Welch, Gary Bishop – Department of Computer Science. University of North Carolina at Chapel Hill Chapel Hill, NC 27599–3175 Updated: Monday, July 24, 2006.
28. Design and control of quadrotors with application to autonomous flying – Samir BOUABDALLAH – ingénieur d'état, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algerie de nationalite algerienne
29. Missiles. Ракетна техніка. Інформаційно-аналітичне інтернет-видання з авіаракетної техніки. URL: <http://www.missiles.com/UAV-2008.htm>. (дата звернення 20.12.2022)

30. Nick Ters, стаття для журналу TomDispatch «American empire project – Robot Warfare» 2012р.
31. The Unmanned Aerial Vehicle Systems Association (UAVS), URL: <http://www.uavs.org/>. (дата звернення 18.11.2022)
32. Unmanned Aerial Vehicles to perform a large panel of missions in the sectors of Aerospace, Defense & Security as well as Energy & Industry. URL: https://www.ecagroup.com/en/find-your-eca-solutions/uav?gclid=Cj0KCQjwoaz3BRDnARIsAF1RfLfZsYcx3PLbKyPq3unGURGrX79bvajMd7Gvr9puGN_PTk4Xn_wkQAaApR5EALw_wcB (дата звернення 20.11.2022)