

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи КТРСм-23-2
Зарубін І. С.
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Комп'ютерні та
робототехнічні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Сотник С.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)

Невлюдов І.Ш.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет АКТ
Кафедра КІТАР
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(код і повна назва)
Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Комп'ютерні та робототехнічні системи
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Зарубіну Ігорю Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення функціональної структури комп'ютерно-інтегрованої системи управління повітряним дроном промислового призначення

Затверджена наказом по університету від 25.11.2024 №1239 Ст.

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16.01.2025 р

3. Вихідні дані до роботи:

3.1 САПР SolidWorks 2022

3.2 Вимоги до ПК: Операційна система Windows 10 Pro 64-bit, ОЗУ 8 ГБ, процесор Intel Core i5-2400 CPU 3.1GHz, Intel HD Graphics 2000, NBIDIA GeForce GTX 1060 6 GB, 22 GB вільного місця для САПР.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ

4.2 Аналіз предметної області

4.3 Розробка системи управління повітряним дроном

4.4 Розробка функціональної структури управління повітряним дроном

4.5 Експериментальні дослідження

4.6 Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 20 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області та опрацювання літератури за темою роботи	25.11.2024	Виконано
2	Вибір архітектури системи управління повітряним дроном	30.11.2024	Виконано
3	Розробка системи управління повітряним дроном	02.12.2024	Виконано
4	Розробка функціональної структури управління повітряним дроном	05.12.2024	Виконано
5	Експериментальні дослідження	10.12.2024	Виконано
6	Охорона праці	15.12.2024	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	17.12.2024	Виконано
8	Подання атестаційної роботи в ЕК	10.01.2025	Виконано

Дата видачі завдання 25.11.2024 р.

Здобувач



(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Зарубін І.С.

(прізвище, ініціали)

доц. Сотник С. В.

(посада, прізвище, ініціали)

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

"03" січня 2025 р



Зарубін І.С.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 130 с., 35 рис., 2 дод., 24 джерела.

ДРОН, ПОВІТРЯНИЙ ДРОН, СТРУКТУРНА СХЕМА, АНАЛІЗ, РОЗРОБКА, МОДЕЛЮВАННЯ, 3D МОДЕЛЬ.

Об'єкт дослідження – комп'ютерно-інтегровані системи управління повітряними дронами для промислового використання.

Предмет дослідження – функціональна структура комп'ютерно-інтегрованої системи управління, включаючи взаємодію підсистем.

Мета роботи – підвищення ефективності та надійності промислових повітряних дронів, за рахунок розробки комп'ютерно-інтегрованої системи його управління.

В кваліфікаційній роботі розглянуто актуальні питання за темою, розроблено функціональну структуру комп'ютерно-інтегрованої системи управління повітряним дроном промислового призначення, були проведені розрахунки часу роботи повітряної платформи.

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 “Промисловість, інновації та інфраструктура”, а саме п.9.4 “Сприяти прискореному розвитку високо- та середньо-високотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інноваційної екосистеми”, індикатор 9.4.1.

Результати, що було отримано під час навчання та підготовки кваліфікаційної роботи висвітлено в статті.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 130 p., 35 fig., 2 appendix, 24 sources.

DRONE, AERIAL ROBOT, STRUCTURAL DIAGRAM, ANALYSIS, DEVELOPMENT, MODELING, 3D MODEL.

The object of research is computer-integrated control systems for aerial drones for industrial use.

The subject of research is the functional structure of the computer-integrated control system, including the interaction of subsystems.

The purpose of the work is to increase the efficiency and reliability of industrial aerial drones due to the development of a computer-integrated system of its control.

In the qualification work, topical issues on the topic were considered, the functional structure of the computer-integrated control system for an industrial aerial drone was developed, and calculations of the operating time of the air platform were carried out. Also, the results of the work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 “Industry, Innovation and Infrastructure”, namely item 9.4 “Promote the accelerated development of high- and medium-high-tech sectors of the processing industry, which are formed on the basis of the use of the “education - science - production” chains and a cluster approach in the areas of: development of the innovation ecosystem”, indicator 9.4.1.

The results obtained during the training and preparation of the qualification work are covered in the article.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	8
Вступ.....	9
1 Основи проектування повітряних дронів	11
1.1 Аналіз предметної області	11
1.2 Аналіз параметрів повітряного дрону	18
1.3 Огляд системи навігації та контролю для повітряних дронів	25
1.4 Висновки до розділу 1	32
2 Розробка системи управління повітряним дроном	34
2.1 Вибір архітектури системи управління повітряним дроном	34
2.2 Опис технологій, які використовуються для дистанційного управління повітряним дроном	47
2.3 Вибір сенсорів для збору інформації повітряним дроном	56
2.4 Висновки до розділу 2	67
3 Функціональна структура комп'ютерно-інтегрованої системи управління повітряним дроном.....	70
3.1 Розробка структури системи управління повітряним дроном	70
3.2 Моделювання конструкції повітряного дрону	82
3.3 Визначення енергоспоживання повітряного дрону.....	103
3.4 Експериментальні дослідження	106
3.5 Охорона праці.....	121
3.6 Моделювання динаміки управління двигуном дрона	122
3.7 Висновки до розділу 3	125
Перелік джерел посилання	129
Додаток А апробація результатів кваліфікаційної роботи	132
Додаток Б демонстраційний матеріал у вигляді презентації	136

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

КІТАМ – комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки

НДР – науково-дослідна робота;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПР – промисловий робот;

САПР – система автоматизованого проектування;

ТАВР – технології та автоматизації виробництва;

ХНУРЕ – Харківський національний університет радіоелектроніки.

ВСТУП

Актуальність використання повітряних дронів у промисловій сфері стрімко зростає через необхідність підвищення ефективності процесів, автоматизації та скорочення витрат. Ці безпілотні пристрої пропонують рішення для виконання складних і критично важливих завдань, які вимагають високої точності, швидкості та мінімального ризику для персоналу. Дрони відіграють ключову роль у таких галузях, як енергетика, будівництво, логістика, гірнична промисловість та інфраструктурний моніторинг, надаючи можливість значно підвищити продуктивність і якість виконання робіт.

Повітряні дрони дозволяють проводити детальний збір даних про стан інфраструктури та об'єктів, зокрема перевірку ліній електропередач, інспекцію вітрових турбін, оцінку стану дорожнього покриття чи конструкцій мостів. У будівництві їх використовують для створення тривимірних моделей об'єктів, спостереження за будівельними майданчиками та моніторингу прогресу робіт у реальному часі. У гірничій промисловості дрони виконують завдання картографування територій, моніторингу стану кар'єрів та інспекції важкодоступних зон.

Використання дронів дозволяє не лише підвищити точність і ефективність виконання завдань, а й значно скоротити витрати. Інтеграція з комп'ютерно-інтегрованими системами управління дозволяє забезпечити автоматизацію процесів збору, аналізу і зберігання даних, що дає можливість оперативного прийняття рішень. Оснащення дронів сучасними сенсорами, тепловізорами та високоточними камерами забезпечує детальну фіксацію стану об'єктів та прогнозування потенційних ризиків.

Сучасні системи управління повітряними дронами підтримують автономну роботу завдяки впровадженню алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання. Такі системи дозволяють дронам самостійно планувати маршрути, уникати перешкод, враховувати погодні умови і навіть взаємодіяти

з іншими дронами у складі єдиної мережі. Це відкриває нові можливості для їх застосування у густонаселених міських районах, віддалених зонах чи умовах з підвищеними вимогами до безпеки.

Таким чином, впровадження повітряних дронів у виробничі процеси стає важливою складовою сучасної індустрії. Вони не лише сприяють оптимізації витрат та підвищенню продуктивності, але й дозволяють досягти нового рівня автоматизації та безпеки у виконанні складних промислових завдань.

Мета роботи – підвищення ефективності та надійності промислових повітряних дронів, за рахунок розробки комп'ютерно-інтегрованої системи його управління.

Об'єкт дослідження – комп'ютерно-інтегровані системи управління повітряними дронами для промислового використання.

Предмет дослідження – функціональна структура комп'ютерної інтегрованої системи управління, включаючи взаємодію підсистем, принципи управління та алгоритми виконання завдань.

Для виконання цієї роботи потрібно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз предметної області;
- розглянути ключові параметри повітряних дронів;
- провести аналіз системи навігації;
- провести аналіз сенсорів повітряних дронів, які можуть бути використані у виробничій сфері;
- розробити функціональну схему взаємодії елементів у системі управління повітряним дроном;
- зробити вибір архітектури системи управління;
- розглянути питання охорони праці;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка [2].

1 ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ДРОНІВ

1.1 Аналіз предметної області

Автоматизація з використанням дронів дозволяє оптимізувати промислові процеси, забезпечуючи автономне виконання завдань, таких як моніторинг, доставка чи обслуговування, з мінімальним втручанням людини [3]. Аеродинамічна конструкція є одним із ключових аспектів у побудові повітряних дронів, призначених для виконання польоту без пілота на борту, управління польотом якого і контроль за яким здійснюються відповідною програмою або за допомогою спеціальної станції управління [4], що безпосередньо впливає на їх ефективність, маневреність та стабільність у повітрі. Вони використовуються в різних сферах, включаючи військову, медичну, аграрну та промислову можна використовувати для багатьох застосувань, де присутність оператора може бути незручною, небезпечною або неможливою [5]. Основна мета аеродинамічного дизайну – мінімізувати опір повітря, зберігаючи оптимальні умови для стабільного польоту. Це особливо важливо для малих і середніх безпілотних літальних апаратів, оскільки будь-яке збільшення опору або порушення аеродинамічного балансу може суттєво вплинути на їхню продуктивність, адже різні елементи конструкції і технологічні рішення не лише визначають технічні характеристики дронів, але й впливають на їх здатність виконувати складні завдання в умовах реального світу [6]. Застосування повітряних дронів дозволяє знизити ризики для людського життя, заощадити ресурси та розширити можливості моніторингу, розвідки та доставки в важкодоступних місцях [7]. Серед найголовніших складових можна виділити такі пункти як: форма корпусу, розташування двигунів та пропелерів для розподілу ваги, вплив вітру та матеріали корпусу.

Для початку розглянемо форму корпусу, яка визначає, як повітря обтікає робот, впливаючи на опір і стабільність польоту. Вузкий, обтічний корпус дозволяє повітрю плавно огинати конструкцію, що зменшує турбулентні зони і, відповідно, знижує енергетичні витрати на подолання опору, приклад обтікаємої форми корпусу повітряного дрону можна побачити на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Приклад обтікаємої форми повітряного дрону

Корпус, який має гострий ніс і плавні лінії, оптимізований для мінімізації лобового опору. Це важливо, оскільки зменшення опору дозволяє значно підвищити ефективність польоту, що, в свою чергу, збільшує тривалість роботи від батареї або палива [8]. Приклад такої будови повітряного дрону можна побачити на рис. 1.2.

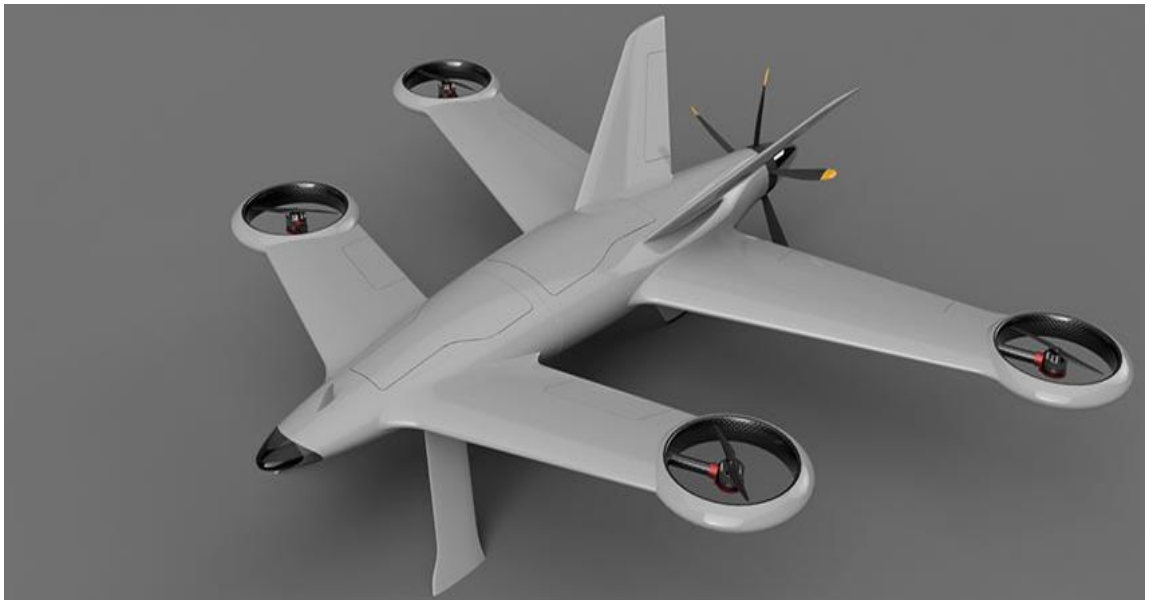


Рисунок 1.2 – Повітряний дрон з гострим носом

Далі проведемо огляд розташування двигунів та пропелерів для розподілу ваги. Найпоширенішими типами приводів є електричні двигуни, які відрізняються високою ефективністю та низьким рівнем шуму. Для більших дронів можуть використовуватися двигуни внутрішнього згорання або гібридні системи [9].

Пропелери повинні бути ретельно підібрані відповідно до характеристик двигуна та вимог до польоту. Важливо враховувати такі параметри, як діаметр пропелера, крок, кількість лопатей та матеріал виготовлення. Оптимізація цих параметрів дозволяє досягти максимальної тяги при мінімальному енергоспоживанні [10].

Розташування двигунів і пропелерів є критично важливим аспектом при розробці аеродинамічних конструкцій для повітряних дронів. Це питання безпосередньо впливає на стабільність, маневреність і ефективність польоту пристрою. Правильна конфігурація забезпечує рівномірний розподіл ваги та симетрію конструкції, що критично для стабільного польоту. Найпоширенішими є конфігурації у формі "X" (рис. 1.3), де двигуни розміщені симетрично на кінцях рами. Таке розташування допомагає підтримувати баланс і покращує маневреність, зменшуючи навантаження на

окремі компоненти та сприяючи стабільності при виконанні складних маневрів.

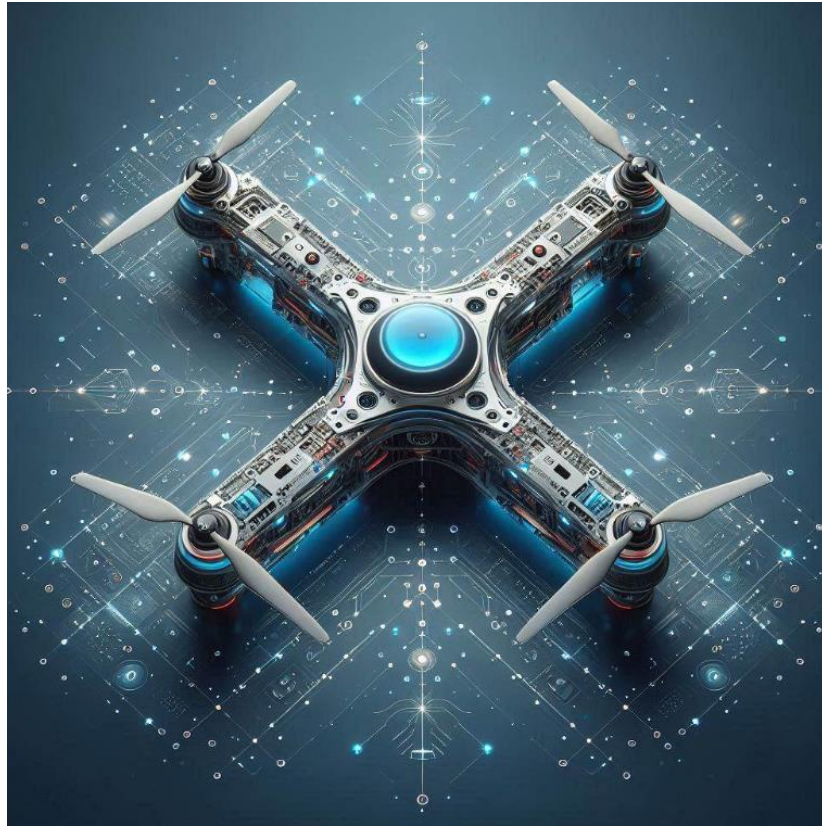


Рисунок 1.3 – Повітряний дрон з форм-фактором «Х»

Асиметричне розташування двигунів може призвести до зміщення центру маси, що створює додаткові навантаження і погіршує керованість. Наприклад, розміщення одного з двигунів ближче до центру може викликати нерівномірний крутний момент, що ускладнює балансування та може спричинити нестабільність на високих швидкостях. Тому важливо ретельно проектувати розташування для уникнення таких проблем. Аеродинамічна ефективність також відіграє важливу роль. Пропелери мають бути достатньо віддалені один від одного, щоб уникнути негативного впливу перехрещування або змішування повітряних потоків, що може знизити ефективність роботи двигунів і збільшити енергетичні витрати. Добре спроектовані конфігурації зменшують ці негативні ефекти і підвищують продуктивність системи.

Крім цих аспектів, важливо враховувати оптимізацію охолодження. Двигуни і пропелери виділяють значну кількість тепла під час роботи, що може впливати на їхню продуктивність і термін служби. Конструкція повинна забезпечити достатню вентиляцію, щоб уникнути перегріву. Відстань між компонентами або системи охолодження можуть допомогти підтримувати оптимальну робочу температуру. Зниження рівня потрібно враховувати так як високий рівень шуму може бути проблематичним як для самого апарата, так і для його оточення, особливо в умовах, де потрібна тиха робота, наприклад, у спостереженні або в густо заселених районах. Конструктори можуть використовувати спеціальні матеріали або конструктивні рішення для зменшення шуму від обертання пропелерів. Можна додати врахування впливу вібрацій, адже невеликі вібрації можуть впливати на стабільність і точність управління. Для зменшення вібрацій використовуються амортизатори або спеціальні кріплення, що знижують передачу вібрацій на основну конструкцію. Міцність і надійність конструкції також мають значення. Двигуни і пропелери повинні бути закріплені так, щоб витримувати навантаження і удари під час польоту. Слабкі кріплення можуть призвести до поломок або аварійних ситуацій, що знижує безпеку експлуатації. Інтеграція системи управління і сенсорів повинна бути врахована, тому що розташування компонентів повинно забезпечувати безперешкодний доступ до сенсорів і систем управління, що дозволяє зменшити ризик механічних перешкод і забезпечує їхню правильну функціональність.

Таким чином, розташування двигунів і пропелерів є складним і багатогранним процесом, що потребує балансування між різними факторами, такими як ефективність, безпека, комфорт експлуатації і загальна продуктивність. Правильне проектування має забезпечити не лише стабільний і маневрений політ, але й надійність і довговічність повітряного дрона в різних умовах.

Наступним у розгляді буде вплив вітру і вибір матеріалів корпусу є критично важливими аспектами при проектуванні системи повітряного

дрона, оскільки вони значно впливають на стабільність, маневреність і загальну ефективність польоту. Вітрові пориви можуть спричинити різкі зміни в напрямку польоту, що ускладнює управління і може призвести до втрати контролю. Для подолання негативного впливу вітру, конструкція повітряного дрона системи повинна бути спроектована таким чином, щоб забезпечувати високу стабільність. Наприклад, моделі з великою кількістю пропелерів, такі як гексакоптери і октакоптери (рис. 1.4, а, б), мають перевагу, оскільки здатні компенсувати вплив поривів вітру завдяки більшій підйомній силі і додатковим резервам для корекції положення. Для зменшення негативного впливу вітру також застосовуються різні алгоритми стабілізації в системах управління, які допомагають підтримувати стабільний політ, коригуючи рухи повітряного дрона системи у відповідь на вітрові збурення.

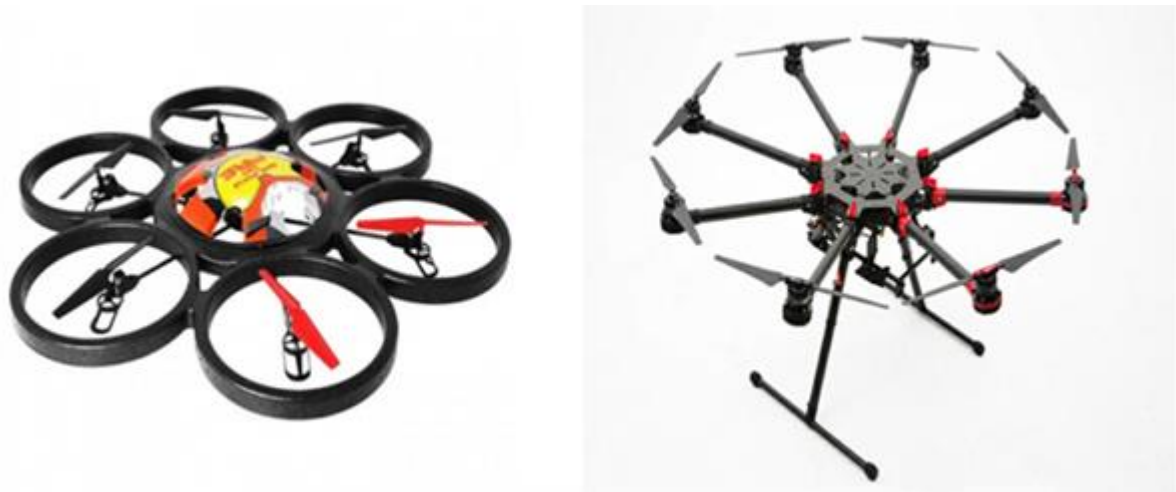


Рисунок 1.4 – Приклад дронів з великою кількістю пропелерів:

а) гексакоптер; б) октакоптер

Матеріали корпусу відіграють ключову роль у забезпеченні надійності і довговічності повітряного дрона системи. Вибір матеріалів залежить від декількох факторів, таких як вага, міцність, зносостійкість та витривалість до впливу зовнішніх умов. Легкі матеріали, такі як вуглепластик і композити на основі карбону, часто використовуються для конструкції корпусу, оскільки

вони забезпечують високу міцність при низькій вазі, що важливо для забезпечення оптимальної маневреності і енергоефективності.

Ці матеріали також мають високу стійкість до механічних навантажень, що дозволяє витримувати удари і знижує ризик пошкоджень під час польоту або посадки. Крім того, деякі елементи системи повітряного дрона оснащуються корпусами з термостійких матеріалів або матеріалів, що мають захисне покриття для запобігання корозії і впливу вологи. Це особливо важливо для апаратів, які працюють у вологих або екстремальних температурних умовах. Вибір відповідних матеріалів також допомагає забезпечити знижений рівень шуму, що може бути критично важливим для певних додатків, таких як спостереження або дослідження.

Високоякісні матеріали корпусу сприяють загальному підвищенню надійності і довговічності повітряного дрона системи, що особливо важливо для апаратів, які експлуатуються в складних або екстремальних умовах.

Таким чином, правильно підібрані матеріали і конструктивні рішення допомагають забезпечити ефективну роботу і стабільність безпілотного літального апарата в умовах різного впливу вітру і зовнішніх факторів. У процесі аналізу предметної області виявлено ключові фактори, які впливають на ефективність використання повітряних дронів у виробничій промисловості. Детально досліджено сучасні тенденції розвитку навігаційних і керуючих систем.

Окрему увагу приділено нормативним вимогам до безпеки та надійності таких пристроїв. Узагальнено особливості застосування повітряних дронів у різних галузях промисловості. Встановлено необхідність врахування специфічних вимог виробничого середовища при проектуванні.

1.2 Аналіз параметрів повітряного дрону

Для ефективного використання повітряного дрону в виробничій промисловості, важливо враховувати кілька ключових параметрів, серед яких критичними є дальність польоту та тривалість роботи, стійкість до погодних умов, якість та надійність зв'язку та саме апаратні характеристики, так як, вони також безпосередньо впливають на тривалість польоту, корисне навантаження та маневреність. Для виробничих завдань часто потрібні компактні повітряні роботизовані платформи, здатні працювати у вузьких і важкодоступних просторах, таких як цехи, трубопроводи або складські приміщення. Дальність польоту є однією з основних характеристик, яку потрібно враховувати. Вона визначається максимальною відстанню, яку дрон може подолати на одному заряді батареї або за допомогою одного запасу пального. Для забезпечення достатньої дальності польоту необхідно враховувати такі фактори, як загальна вага дрону, обрані компоненти, а також можливі географічні умови, які можуть вплинути на ефективність польоту. Наприклад, пересічений рельєф, наявність дерев, будівель або інші перешкоди можуть спричинити зменшення дальності польоту через підвищене навантаження на систему управління або через необхідність обходу цих перешкод.

Тривалість роботи також є критично важливою. Вона визначається часом, протягом якого дрон може функціонувати без підзарядки або заміни батарей. Це включає в себе не тільки час польоту, але й періоди, необхідні для виконання завдань, таких як огляд території і збір даних. Для досягнення тривалої роботи важливо вибрати акумулятори з високою ємністю, які можуть забезпечити необхідний час функціонування. Крім того, розгляньте можливість інтеграції системи автоматичного повернення на базу для підзарядки або заміни батарей, що дозволить зменшити кількість перерв у роботі. Оптимізація тривалості роботи також може бути досягнута за рахунок ефективного використання енергетичних ресурсів. Це включає в себе

використання енергозберігаючих режимів польоту, управління витратами енергії і планування маршрутів для мінімізації енергетичних витрат. Важливо врахувати всі ці фактори при проектуванні і налаштуванні дрона, щоб забезпечити безперебійний огляд і збирання даних на великих територіях.

У разі, якщо покриття території перевищує можливості одного заряду або тривалості роботи, можна застосувати стратегії, такі як розподіл роботи між кількома дронами або забезпечення можливості заміни батарей на місці за допомогою спеціальних станцій для зарядки або обслуговування. Це дозволить оптимізувати процеси та забезпечити безперервну роботу на великих площах. Так як це не один ключовий фактор, переглянемо іншу проблемну зону цієї сфери використання повітряних дронів, а саме стійкість до погодних умов.

Для забезпечення надійної роботи повітряного дрону в умовах виробничих цехів, тощо, важливо ретельно продумати захист корпусу від негативних зовнішніх факторів, а саме три ключові аспекти, які потрібно враховувати, це водонепроникність, стійкість до пилу та термічна стійкість. Кожен з цих аспектів грає критичну роль у довговічності та ефективності роботи дрону.

Водонепроникність є одним з найважливіших аспектів для забезпечення надійності дрону в умовах дощу, вологості чи снігу. Щоб досягти високого рівня водонепроникності, корпус повинен бути спроектований з урахуванням кількох критичних елементів. По-перше, герметичні ущільнення навколо з'єднань, кришок, портів і інших відкритих частин корпусу забезпечують запобігання проникненню води всередину. Ці ущільнення повинні бути виготовлені з високоякісних водонепроникних матеріалів, таких як силіконові або гумові вставки, які зберігають свої властивості в умовах різних температур і вологості.

По-друге, корпус має бути виготовлений з водонепроникних матеріалів. Це можуть бути спеціально оброблені пластикові або металеві сплави, які мають захисні покриття, що відштовхують воду. Також можливе

використання композитних матеріалів, які поєднують водовідштовхувальні властивості з міцністю і легкістю. Для підтвердження рівня захисту часто використовують IP-рейтинг (Ingress Protection), де для досягнення ефективної водонепроникності рекомендується мінімальний рівень IP67 (рис. 1.5).

0	Без спеціального захисту	0	Без спеціального захисту
1	Захист від дотику великих частин тіла (рука)	1	Захист від вертикально падаючих крапель води
2	Захист від дотику менших частин тіла (пальці)	2	Захист від падаючих крапель води під кутом до 15 градусів
3	Захист від проникнення твердих тіл розміром більше 2,5 мм	3	Захист від розпилення води з будь-якого напрямку до 60 градусів
4	Захист від проникнення твердих тіл розміром більше 1 мм	4	Захист від бризок води з будь-якого напрямку
5	Захист від пилу. Обмежене проникнення	5	Захист від низько тискових струменів води
6	Повний захист від пилу	6	Захист від високо тискових струменів води з будь-якого напрямку
		7	Захист від короткочасного занурення у воду на глибину 15-100 см
		8	Захист від тривалого занурення у воду
		9	Захист від високотемпературних струменів води під високим тиском з різних напрямків

Rating Sample

IP67

Рисунок 1.5 – Розшифровка стандарту IP67

Це забезпечує захист від тимчасового занурення у воду на певну глибину, що є критичним для забезпечення функціональності дрона в умовах сильного дощу або вологи.

Переходячи до іншого важливого аспекту захисту, стійкість до пилу є не менш критично важливою характеристикою для ефективної роботи в пилових або запилених умовах. У таких середовищах, де наявність пилу може бути значною, корпус повітряного дрона повинен бути ретельно спроектований, щоб запобігти проникненню частинок пилу всередину і забезпечити надійну функціональність всіх його компонентів.

Перш за все, для забезпечення стійкості до пилу використовуються пилонепроникні ущільнення, та захисні екрани які також допомагають у захисті як від механічних пошкоджень так і від пилу. Ці ущільнення або захисні екрани розташовуються навколо з'єднань, кришок, портів та особливо

камер, якщо вони наявні (рис. 1.6, а, б) і інших відкритих частин корпусу, щоб переконатися, що пил не проникає всередину.

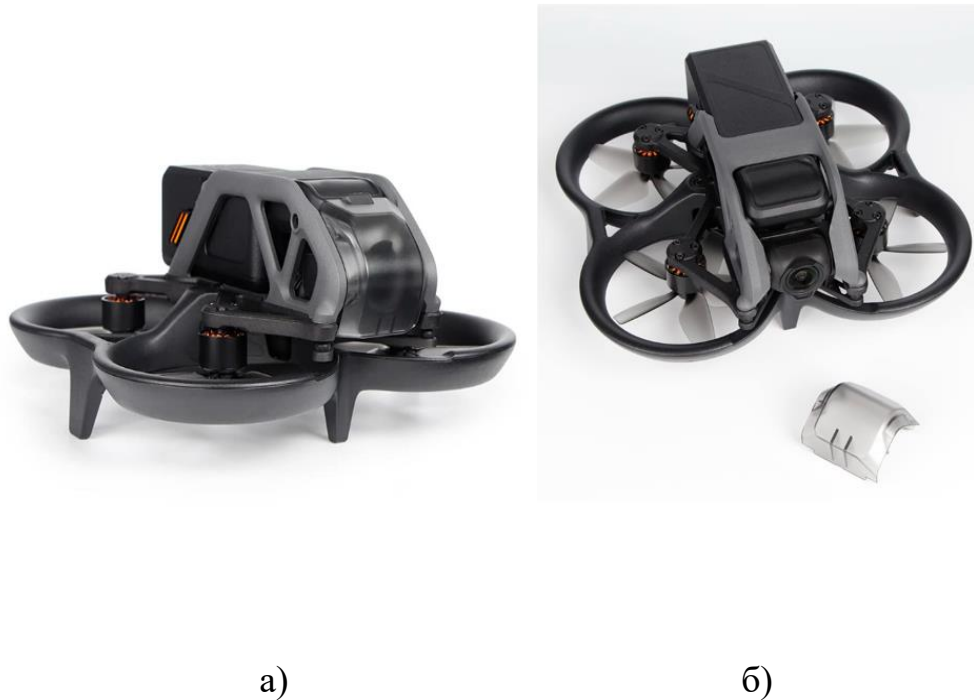


Рисунок 1.6 – Приклад захисного екрану з пилозахистом для камери DJI Avata: а) встановлений захисний екран; б) камера без захисту

Вони виготовлені з високоякісних матеріалів, таких як гумові або силіконові вставки, які створюють герметичний бар'єр, перешкоджаючи попаданню пилу всередину корпусу. Також важливо, щоб конструкція корпусу забезпечувала належну посадку та фіксацію частин, що зменшує ризик проникнення пилу.

Спеціальні фільтри і герметичні вставки використовуються для додаткового захисту. Фільтри можуть бути встановлені на вентиляційних отворах, які забезпечують вентиляцію внутрішніх компонентів, але також повинні бути оснащені елементами, які затримують частинки пилу. Герметичні вставки в місцях з'єднання або доступу до компонентів допомагають підтримувати чистоту всередині корпусу і запобігають накопиченню пилу на критичних елементах. Важливо також забезпечити додатковий захист внутрішніх елементів. Електронні плати, механічні

частини та інші критичні компоненти повинні бути розміщені в герметичних контейнерах або покриті спеціальними плівками, що відштовхують пил. Такі покриття допомагають захистити елементи від небажаного впливу частинок пилу, що може призвести до їхнього забруднення або пошкодження. Герметичні контейнери забезпечують фізичний бар'єр, який захищає компоненти від прямого контакту з пилом.

Регулярне технічне обслуговування також грає важливу роль у підтриманні стійкості до пилу. Легкість доступу до внутрішніх частин для очищення і перевірки дозволяє своєчасно усувати накопичений пил і забезпечувати тривалу ефективність роботи. Модульна конструкція корпусу або легкий доступ до важливих компонентів може суттєво полегшити цей процес.

Після забезпечення надійного захисту корпусу від води і пилу, важливо звернути увагу на інші критичні аспекти, такі як термічна стійкість. Вона визначає здатність корпусу витримувати екстремальні температури, як високі, так і низькі, що є особливо важливим для роботи в різних кліматичних умовах.

Термічна стійкість корпусу є ключовим фактором для забезпечення надійності та ефективності роботи повітряного дрона в умовах, що характеризуються екстремальними температурами. Це забезпечує можливість стабільного функціонування в різних кліматичних умовах, як в умовах надзвичайно високих, так і низьких температур. Для досягнення цієї стійкості важливо враховувати кілька основних аспектів, які будуть розглянуті далі.

Першим з аспектів можна виділити саме термостійкі матеріали, тому що корпус повітряного дрона повинен бути виготовлений з матеріалів, що витримують широкий діапазон температур. Це включає використання спеціально оброблених пластикових сплавів, металевих легуючих компонентів або композитних матеріалів, які забезпечують стійкість до деформацій і зменшення механічних властивостей при екстремальних температурах. Наприклад, в умовах високих температур можуть бути

використані термостійкі пластики з вогнестійкими добавками, які не втрачають свою міцність і форму при нагріванні. У холодних умовах може бути доцільно використовувати матеріали, що зберігають свою гнучкість і стійкість до тріщин навіть при низьких температурах. Після врахування термостійких матеріалів потрібно подбати про охолодження і ізоляцію, адже для правильної роботи при високих температурах важливо забезпечити ефективне охолодження. Це може включати системи активного охолодження, такі як вентилятори або рідинні охолоджувачі, які допомагають знижувати температуру корпусу та внутрішніх компонентів. Також можуть використовуватися вентиляційні отвори або спеціальні решітки для поліпшення повітряного потоку і зниження температури (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Приклад радіатора охолодження

Для захисту від холодних температур може знадобитися термостатична ізоляція, яка допомагає підтримувати оптимальну температуру всередині

корпусу. Це може включати теплоізоляційні покриття або підігрівачі, що забезпечують захист від холоду і замерзання внутрішніх компонентів.

Для забезпечення безперебійної роботи потрібно проводити тестування і сертифікації. Щоб гарантувати термічну стійкість корпусу, важливо проводити всебічне тестування. Це може включати термічні цикли, при яких корпус піддається чергуванню високих і низьких температур, щоб перевірити його на витривалість і стабільність. Тестування повинно включати не тільки перевірку на стійкість до термічних впливів, але і перевірку на механічну міцність при змінах температури, так як різкі температурні коливання можуть призвести до деформацій або тріщин. Сертифікація відповідно до міжнародних стандартів, таких як MIL-STD-810 або IEC 60068, може бути необхідною для підтвердження відповідності корпусу до вимог термічної стійкості.

Важливо також враховувати специфічні термічні умови, в яких буде експлуатуватися дрон. Це може включати вплив прямого сонячного світла, температурні коливання протягом доби або річного сезону, а також термічні зміни, що викликані навколишнім середовищем, такими як відблиски від землі або рослинності. Тому розробка корпусу повинна включати аналіз можливих термічних навантажень і забезпечення надійного захисту від них. Для моніторингу термічних умов корпусу та внутрішніх компонентів можуть бути інтегровані термічні сенсори, які забезпечують реальний час моніторинг температури. Це дозволяє своєчасно реагувати на перегрів або переохолодження і автоматично регулювати системи охолодження або підігріву відповідно до вимог.

Таким чином, забезпечення термічної стійкості корпусу є комплексним процесом, що включає використання термостійких матеріалів, ефективні системи охолодження та ізоляції, всебічне тестування і сертифікацію, а також моніторинг термічних умов для підтримання оптимальної роботи дрону в різних кліматичних умовах.

Підсумовуючи, забезпечення надійного захисту корпусу від води, пилу і екстремальних температур є критично важливим для забезпечення довговічності та стабільної роботи повітряного дрону, особливо в складних умовах виробничої промисловості. Герметичні ущільнення, спеціальні фільтри та пилонепроникні вставки запобігають проникненню води та пилу всередину корпусу, що захищає внутрішні компоненти від небажаного впливу. Крім того, термічна стійкість корпусу, забезпечена термостійкими матеріалами та ефективними системами охолодження і ізоляції, гарантує стабільну роботу при екстремальних температурах. Всі ці елементи сприяють безперебійній функціональності та довговічності пристрою, забезпечуючи його ефективність і надійність в будь-яких умовах.

В цьому розділі було розглянуто основні параметри, що впливають на продуктивність повітряних дронів у виробничих умовах. Особливу увагу приділено таким показникам, як вантажопідйомність, енергоефективність та тривалість автономної роботи. Виявлено, що стійкість до впливу зовнішніх факторів, таких як температура, вологість і запиленість, є критично важливою для промислового застосування. Узагальнено рекомендації щодо вибору матеріалів і компонентів для підвищення надійності. Встановлено залежність між параметрами дронів і вимогами до виробничих процесів.

1.3 Огляд системи навігації та контролю для повітряних дронів

У сучасному світі технології навігації та контролю для повітряних дронів швидко розвиваються, відкриваючи нові можливості для їх використання в різних сферах, включаючи виробництва. Новітні досягнення в цих системах забезпечують підвищену точність, автономність і ефективність, що є критично важливим для збору даних та виконання складних завдань у складних умовах. Приклад роботи радару можна побачити на рис. 1.8.

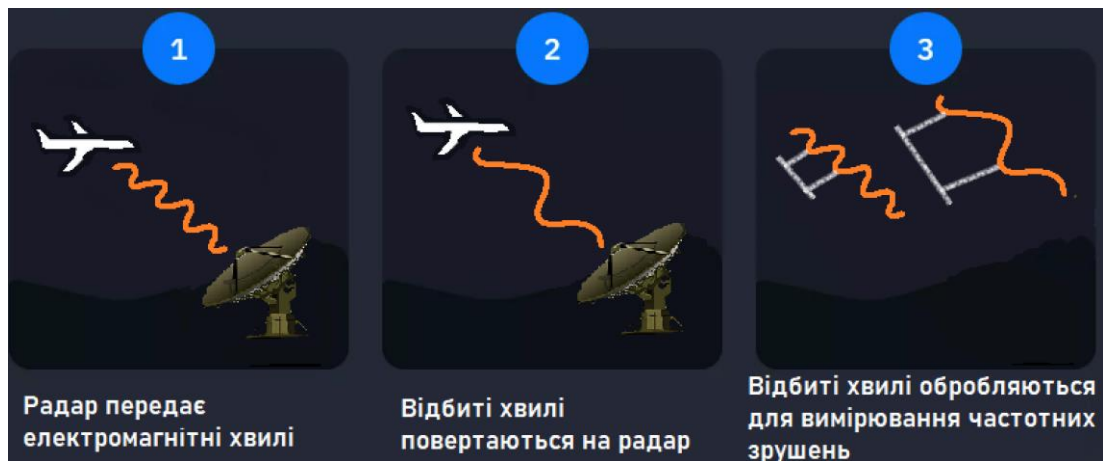


Рисунок 1.8 – Принцип роботи радару

Новітні сенсорні технології, такі як LIDAR (Light Detection and Ranging) та радары, значно покращують точність вимірювань і навігаційних систем. LIDAR, наприклад, дозволяє створювати детальні 3D-карти об'єктів і територій, що є особливо корисним для інспекції промислових об'єктів, моніторингу інфраструктури та виявлення перешкод у складних умовах виробництва (рис. 1.9).

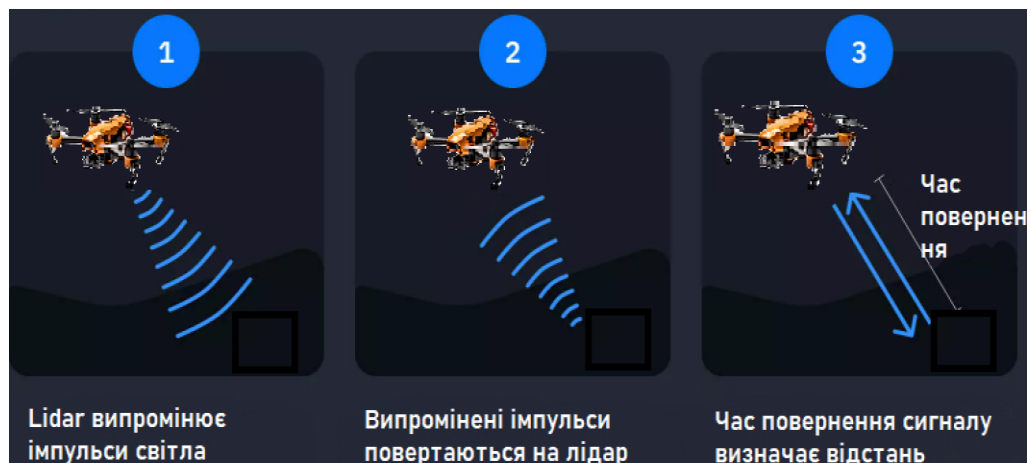


Рисунок 1.9 – Принцип роботи Lidar

Інтеграція LIDAR з іншими сенсорами дозволяє досягти високої точності в умовах поганої видимості [11]. Огляд новітніх технологій і тенденцій у сфері навігації та контролю для повітряних дронів також включає ряд інших важливих досягнень, які впливають на їх функціональність і

ефективність. Серед важливих напрямків розвитку сучасних систем управління промисловими роботами можна відзначити вдосконалення алгоритмів обробки даних, нові сенсорні технології та покращення систем автономії. Вдосконалення алгоритмів обробки даних сприяє підвищенню точності і швидкості навігаційних систем. Сучасні алгоритми здатні обробляти великі обсяги даних у реальному часі, що дозволяє дронам ефективно реагувати на змінні умови навколишнього середовища. Наприклад, алгоритми обробки зображень можуть покращити виявлення та розпізнавання об'єктів у складних умовах, що є критичним для виконання завдань, наприклад, для інспекції виробничих ліній чи виявлення пошкоджень в інфраструктурі. Нові сенсорні технології, такі як високочутливі оптичні сенсори і ультразвукові системи, значно покращують можливості дронів, дозволяючи точніше вимірювати відстань до об'єктів, а також виявляти зміни в навколишньому середовищі, що є важливими для виконання завдань, наприклад, для моніторингу стану обладнання чи проведення діагностики систем. Покращені системи автономії є ще однією важливою тенденцією, оскільки вони забезпечують більшу гнучкість і незалежність роботи дронів, що є особливо важливим для завдань, які потребують тривалого або складного виконання. Такі системи можуть автоматично планувати маршрути, коригувати їх у реальному часі та виконувати завдання без необхідності постійного втручання оператора. У поєднанні, ці технології відкривають величезні можливості для розвитку систем навігації та контролю промислових дронів, дозволяючи їм ефективніше збирати дані про навколишнє середовище і оперативно реагувати на зміни в умовах виробничих процесів.

Датчики вологості є невід'ємною частиною багатьох виробничих процесів, де контроль вологості має критичне значення для забезпечення стабільності, якості та безпеки продукції. Вони використовуються для вимірювання рівня вологості в таких галузях, як хімічна, фармацевтична, текстильна, харчова промисловість, а також у багатьох інших.

У фармацевтичній промисловості вологість є одним із найважливіших параметрів, оскільки вона може вплинути на якість і збереження лікарських засобів. Невірний рівень вологості може призвести до руйнування активних компонентів препаратів або до їх мікробіологічного зараження. Завдяки використанню датчиків вологості фармацевтичні компанії можуть підтримувати оптимальні умови зберігання, що дозволяє зберегти ефективність і безпечність лікарських засобів [12].

У текстильній промисловості контроль вологості важливий для підтримки якості матеріалів та для стабільної роботи обладнання. Недостатній рівень вологості може призвести до пошкодження тканин, зниження їх еластичності та міцності, а також до збоїв у роботі ткацьких і прядильних верстатів. Встановлення датчиків вологості на виробництві дозволяє підтримувати оптимальні умови для роботи з волокнами, що підвищує якість продукції та знижує ймовірність поломок обладнання [13].

У хімічних виробництвах датчики вологості використовуються для моніторингу вологості хімічних реагентів, що може бути критичним для забезпечення точності реакцій. Зміни вологості можуть вплинути на кінцеві властивості продукту, тому в таких виробництвах застосовуються датчики для забезпечення стабільних умов, що сприяє покращенню якості продукції [14].

Використання датчиків вологості також є важливим для забезпечення оптимальних умов у процесах сушки або обробки матеріалів, що чутливі до змін вологи. Наприклад, у процесах сушки металевих частин, паперу чи харчових продуктів, занадто висока або низька вологість може призвести до порушення технології або навіть до пошкодження продукту. Датчики вологості дозволяють контролювати ці параметри в реальному часі, що дозволяє своєчасно коригувати процеси та зберігати високу якість кінцевої продукції.

Завдяки інтеграції датчиків вологості в автоматизовані системи управління, підприємства можуть значно знизити витрати на енергію та

ресурси, адже точний контроль вологості дозволяє уникнути надмірного споживання води або енергії. Крім того, ці датчики дозволяють запобігти виникненню дефектів у продукції, підвищити ефективність процесів і знизити ризики від помилок, що виникають через нестабільність вологості [15].

Використання датчиків вологості в промисловості дозволяє зберігати високу якість продукції, покращити роботу обладнання та оптимізувати процеси. Вони є важливим елементом сучасних автоматизованих систем, що дозволяє підприємствам знизити витрати і покращити ефективність виробництва.

Переходимо до розгляду датчиків температури, вони є важливими елементами в багатьох промислових процесах, де точний контроль температури критично важливий для забезпечення безпеки, ефективності та якості продукції. Вони використовуються в таких сферах, як хімічне виробництво, енергетика, автомобільна промисловість, харчова промисловість та багатьох інших.

Одним з найбільш поширених типів датчиків температури є термопари. Ці датчики складаються з двох різних металів, з'єднаних на одному кінці, де при нагріванні утворюється електричний сигнал, пропорційний температурі. Термопари мають широкий діапазон вимірювання температури та високу стійкість до механічних пошкоджень, що робить їх ідеальними для використання в умовах високих температур, таких як обробка металів чи моніторинг печей. Проте вони мають нелінійний вихід, тому потребують калібрування для точної роботи [16].

RTD (детектор температури за опором) – це ще один популярний тип датчика температури, який використовується в багатьох промислових процесах, де необхідна висока точність вимірювань. RTD засновані на зміні опору матеріалу, зазвичай платини, при зміні температури. Вони відзначаються стабільністю та точністю, тому часто використовуються в

хімічному виробництві, фармацевтичній промисловості та для моніторингу температури в енергетичних установках, таких як котли та турбіни [17].

Термометри інфрачервоні або пірометри дозволяють вимірювати температуру без контакту з об'єктом, що робить їх ідеальними для застосування в середовищах, де прямий контакт може бути небезпечним або неможливим. Такі датчики використовуються в умовах високих температур, наприклад, у сталеливарній промисловості, при виробництві скла, в печах і на котлах. Інфрачервоні датчики дозволяють вимірювати температуру об'єкта за допомогою його інфрачервоного випромінювання [18].

Датчики температури також використовуються для забезпечення енергетичної ефективності в промислових установках. Вони застосовуються в HVAC системах для регулювання температури в виробничих приміщеннях і допомагають знижувати витрати на опалення чи охолодження, підтримуючи стабільний клімат. Наприклад, в автоматизованих системах для контролю температури, датчики температури відстежують зміни і допомагають підтримувати оптимальні умови для роботи, що забезпечує високий рівень ефективності та знижує енергетичні витрати [19].

Крім того, сучасні технології дозволяють інтегрувати температурні датчики з автоматизованими системами управління, що дозволяє здійснювати моніторинг температури в реальному часі і своєчасно виявляти будь-які аномалії. Це важливо для забезпечення безпеки, адже правильний контроль температури дозволяє запобігати перегріву обладнання та мінімізувати ймовірність поломок. Такі системи широко використовуються в енергетичних установках і в хімічних виробництвах. У результаті, датчики температури відіграють вирішальну роль у забезпеченні ефективності та безпеки виробничих процесів. Вони дозволяють точно контролювати температурні режими, підвищувати продуктивність, покращувати якість продукції та знижувати витрати, що робить їх незамінними в сучасних промислових умовах. Наступним в розгляді будуть тепловізори, які використовують інфрачервоні датчики для вимірювання температури об'єктів, стали

незамінними інструментами в різних промислових сферах. Вони дозволяють безконтактно виявляти температурні аномалії на великих площах і виявляти потенційні проблеми до того, як вони стануть критичними, що значно знижує ризик аварій та поломок обладнання. Ці пристрої використовуються в хімічній, енергетичній, металургійній і багатьох інших галузях для моніторингу процесів, забезпечення безпеки та підвищення ефективності виробництва. Для розуміння важливості застосування тепловізорів потрібно більш детально розглянути їх сферу використання на виробництвах в різних галузях:

- енергетика, цій сфері тепловізори активно використовуються для перевірки обладнань, таких як трансформатори, генератори, котли та інші. Вони дозволяють вчасно виявити перегрів, що може призвести до серйозних поломок і навіть аварій. Встановлення тепловізорів на об'єктах дозволяє здійснювати моніторинг 24/7, що покращує планування технічного обслуговування і знижує непередбачені витрати на ремонт;

- металургія та хімічне виробництво, в цій же сфері через високотемпературні процеси, такі як плавка та обробка металів, вимагають точного контролю температури для забезпечення якості продукції. Тепловізори дозволяють точно вимірювати температуру металу, що проходить через виробничі лінії, і вчасно виявляти дефекти в процесі обробки;

- у будівництві тепловізори також використовуються для виявлення проблем з теплоізоляцією в будівлях, наприклад, у випадках, коли є втрати тепла або вода потрапляє в стіни. Вони допомагають діагностувати проблеми, що не видно неозброєним оком, і вчасно вжити заходів для їх усунення, що може суттєво знизити енергоспоживання та покращити комфортність приміщень;

- варто також зазначити безпековий аспект, адже тепловізори використовуються для моніторингу безпеки на підприємствах, таких як виявлення перегріву обладнання або навіть раннє виявлення загроз пожежі.

Вони дозволяють відслідковувати температурні зміни в реальному часі і оперативно реагувати на аномалії, що знижує ризик нещасних випадків і збитків [20].

Переваги тепловізорів:

- безконтактні моніторинги, які дозволяють здійснювати вимірювання без контакту з об'єктами, що важливо для безпеки при роботі з обладнанням під високими температурами або в небезпечних умовах;

- точність та швидкість, тому що сучасні тепловізори мають високу точність і здатність виявляти навіть незначні зміни температури, що є критичним для виробничих процесів, де кожен градус може впливати на якість кінцевого продукту [21];

- збільшення ефективності обслуговування. Інтеграція тепловізорів в автоматизовані системи управління дозволяє здійснювати безперервний моніторинг і вчасно реагувати на потенційні проблеми, що знижує час простоїв і зменшує витрати на ремонт [22].

Тепловізори стали важливим інструментом для моніторингу температурних режимів у промисловості, сприяючи підвищенню ефективності виробничих процесів, зменшенню витрат та покращенню безпеки. Вони дозволяють виявляти потенційні проблеми на ранніх етапах і таким чином запобігати серйозним поломкам, що робить їх незамінними для сучасних підприємств, які прагнуть до автоматизації та підвищення надійності своїх операцій.

1.4 Висновки до розділу 1

У цій главі детально проаналізовано сучасні навігаційні системи, що забезпечують автономну роботу аеромобільних дронів у різних умовах експлуатації. Зокрема, розглядаються такі методи навігації, як GPS-навігація та використання оптичних датчиків. Проаналізовано їх переваги та недоліки у виробничих умовах, де точність, надійність та адаптивність відіграють

важливу роль: Хоча GPS-навігація забезпечує високу точність позиціонування на великих відстанях, її може бути складно використовувати в приміщенні або в зонах зі слабким сигналом. У таких випадках використання датчиків освітленості є важливим доповненням, оскільки вони забезпечують локальну навігацію, аналізуючи навколишнє середовище. Також було виявлено, що поєднання різних методів навігації, наприклад, інтеграція GPS і оптичних датчиків, може підвищити точність і надійність системи. Такий підхід забезпечує стійкість до зовнішніх перешкод і підвищує ефективність повітряних дронів навіть у суворих умовах. У статті також проаналізовано конструктивні особливості, кількість і тип двигунів, аеродинаміку і геометрію, які впливають на стабільність польоту повітряних дронів. Розглядаються такі параметри, як вантажопідйомність, енергоефективність, точність навігації, тривала автономна робота і можливість інтеграції з різними датчиками, які слід враховувати при використанні повітряних дронів у виробничому секторі. Результати показують, що правильний вибір і конфігурація навігаційної системи в поєднанні з оптимізованою конструкцією мають значний вплив на продуктивність і функціональність повітряних дронів. Таким чином, аналіз дає уявлення про ключові моменти при розробці навігаційних систем для повітряних дронів і підкреслює важливість врахування технічних і експлуатаційних параметрів для забезпечення високої ефективності і надійності у виробничому середовищі.

2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ ДРОНОМ

2.1 Вибір архітектури системи управління повітряним дроном

У промисловій сфері автономні повітряні системи стали важливим інструментом для моніторингу, діагностики та оптимізації виробничих процесів. Використання роботизованих систем у виробництві є ключовим напрямком розвитку промисловості, спрямованим на автоматизацію та оптимізацію виробничих процесів [23]. Вибір оптимальної архітектури системи управління повітряним роботом є ключовим для забезпечення надійності, продуктивності та гнучкості. Ця архітектура визначає здатність пристрою адаптуватися до різних умов роботи та виконувати складні завдання з високою точністю.

Сучасні технології пропонують широкий спектр компонентів для інтеграції в автономні промислові платформи. Проектуючи архітектуру системи управління, слід враховувати специфіку завдань, таких як інспекція обладнання, тепловий моніторинг або виявлення дефектів. Використання автономних авіаційних платформ у промисловості відкриває можливості для автоматизації процесів, підвищення безпеки та зменшення витрат.

Надійність систем управління є критичною для забезпечення безпеки польотів та точності збору даних. Інтеграція з існуючими технологіями та дотримання стандартів також важливі при виборі архітектури. Наприклад, використання сучасних польотних контролерів може значно розширити можливості адаптації системи.

Здатність обробляти дані в реальному часі є ключовою для швидкого реагування на зміни умов. Архітектура повинна бути гнучкою для майбутніх оновлень. Вибір сенсорів та оптичних систем є вирішальним для ефективного збору інформації.

Інтеграція всіх компонентів системи повинна забезпечувати безперебійну роботу. Це вимагає ретельного аналізу вимог до енергоспоживання, ваги та розмірів. Якість та точність сенсорів безпосередньо впливають на надійність системи.

Сучасні автономні повітряні пристрої повинні виконувати самостійні місії, що вимагає складного програмного забезпечення для управління польотом та обробки даних. Вибір архітектури також визначає можливості зберігання та аналізу зібраної інформації.

Важливо враховувати вплив навколишнього середовища, такого як вітер та вологість, на роботу повітряного дрона, адаптивність до різних погодних умов є ключовим фактором для ефективного застосування автономних повітряних систем.

Почнемо з розгляду центрального блоку управління. Центральний блок управління є основою всієї системи, відповідальною за координацію та управління роботою автономного повітряного пристрою. Він обробляє дані, що надходять із сенсорів, і приймає рішення, виходячи з цих даних, що забезпечує ефективне виконання завдань. Цей блок реалізує основні алгоритми навігації, контролю польоту та обробки інформації, що надходить від датчиків.

Важливою характеристикою центрального блоку є його здатність до інтеграції з різноманітними компонентами системи. Це дозволяє пристрою виконувати складні маневри та адаптуватися до змін у навколишньому середовищі, що особливо важливо в умовах виробництва. Завдяки надійній обробці даних, система може реалізувати функції автоматичного уникнення перешкод, що підвищує безпеку польотів. Контроль польоту здійснюється за допомогою високоточних алгоритмів, які враховують як вхідні дані від сенсорів, так і зовнішні умови. Це включає моніторинг таких параметрів, як температура, вологість та вітрові умови, що безпосередньо впливають на ефективність роботи пристрою. Центральний блок управління здатний збирати ці дані і зберігати їх для подальшого аналізу, що є важливим для

оцінки ефективності виконаних завдань. Збір таких даних дозволяє проводити точний аналіз і визначати можливі проблеми або області для поліпшення. Однією з переваг цієї системи є можливість швидкого коригування алгоритмів роботи в залежності від специфіки завдання. Це забезпечує високу гнучкість і адаптивність системи для виконання різноманітних завдань, таких як моніторинг технічного обладнання або інспекція інфраструктури. Крім того, система може взаємодіяти з операторами через інтерфейси управління, що дає змогу оперативно коригувати параметри роботи в реальному часі. Це дозволяє більш ефективно адаптувати систему до змінних умов і підвищити точність виконання місій, забезпечуючи максимальну ефективність і стабільність у промислових застосуваннях.

Управління живленням також є важливою функцією центрального блоку. Він контролює енергоспоживання всіх компонентів, що дозволяє оптимізувати час польоту і підвищити загальну ефективність. Завдяки наявності різних датчиків, блок може автоматично регулювати потужність, що надходить до двигунів у відповідності до умов експлуатації, ще однією важливою характеристикою є можливість оновлення програмного забезпечення.

Це дозволяє впроваджувати нові функції та алгоритми, покращуючи продуктивність системи без необхідності фізичної заміни компонентів. Регулярні оновлення також допомагають покращити безпеку системи, усуваючи можливі вразливості. Центральний блок управління також може забезпечувати телеметрію, яка надає реальну інформацію про стан системи оператору. Це включає дані про висоту, швидкість, навантаження на сенсори та рівень заряду батареї. Телеметричні дані є важливими для аналізу результатів польоту та корекції майбутніх місій.

Завдяки інтеграції з системами обробки даних, центральний блок управління може в реальному часі аналізувати стан промислового обладнання. Це є важливим інструментом для операторів і інженерів,

оскільки дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо обслуговування та оптимізації виробничих процесів. Аналіз даних також може використовуватися для створення звітів, що демонструють ефективність проведених заходів або виявляють слабкі місця в системі.

Одним із важливих аспектів є забезпечення безпеки та стабільності системи. Центральний блок управління контролює всі критично важливі параметри, такі як стабільність польоту, стан тепловізора, сенсорів температури, вологості та інших компонентів.

Це дозволяє запобігти аваріям і збоїв у роботі, забезпечуючи ефективність промислових операцій. Зокрема, центральний блок може автоматично коригувати висоту польоту або змінювати маршрут залежно від отриманих даних про стан навколишнього середовища чи об'єктів інспекції. У результаті, центральний блок виконує ключову роль у забезпеченні ефективності та надійності автономного повітряного пристрою. Його можливості включають обробку великих обсягів даних, управління критично важливими системами та адаптацію до змінних умов.

Це робить його незамінною частиною архітектури системи управління, яка забезпечує безперебійну роботу і досягнення поставлених цілей у промисловій сфері.

Наступним компонентом розгляду буде система управління моторами, приклад якої показано на рисунку 2.1, що забезпечує необхідну маневреність та стабільність під час польоту, тому що він фактично відповідає за управління електродвигунами, які забезпечують можливість здійснювати підйом, спуск і маневри апарату коли він знаходиться в просторі.



Рисунок 2.1 – Hobbywing Skywalker 40A

У нашій системі ми обрали контролери двигунів Hobbywing Skywalker 40 A, які добре підходять для моторової конфігурації 2204 2300KV (рис. 2.2). Серед аналогів можна виділити декілька варіантів: ESC із прошивкою BLHeli, Turnigy Plush 40 A, ESC із прошивкою SimonK. ESC на базі BLHeli відомі програмованістю та плавною реакцією на зміну обертів, що робить їх популярними серед мультикоптерів. Однак Skywalker 40 A оптимізований для фіксованокрилих літальних апаратів, де пріоритетом є стабільність роботи, що більше підходить для виробничих завдань де можуть бути присутніми доволі тривалі прольоти, в порівнянні з Turnigy Plush 40 A, обидві моделі забезпечують високу силу струму та надійність, але Skywalker 40 A має вдосконалений вбудований ВЕС (5 В/5 А), що полегшує інтеграцію з багатьма автопілотами, як-от Pixhawk. У Turnigy Plush ВЕС може мати меншу ефективність охолодження й стабільність роботи в умовах високих температур. У випадку розгляду ESC із прошивкою SimonK, які відомі швидкою реакцією, що робить їх ідеальними для повітряних дронів із частими змінами швидкості. Проте для апаратів із фіксованими маршрутами Skywalker 40 A забезпечує плавну роботу з мінімальною потребою у налаштуванні. Тому після проведеного аналізу аналогів було обрано саме

Skywalker 40 A через тепловіддачу (Skywalker 40 A має ефективну систему відведення тепла, що гарантує стабільну роботу навіть у високотемпературних умовах, що критично важливо на виробництвах де діапазон температур може відрізнятись), простоту налаштування (На відміну від ESC із SimonK або BLHeli, які потребують прошивки, Skywalker готовий до використання з коробки. Це економить час і зменшує ризик помилок під час конфігурації.), інтегрований BEC (Battery Elimination Circuit, який стабільно видає 5 В для живлення автопілота та інших електронних компонентів, що усуває потребу в додаткових стабілізаторах напруги.) та через надійність та ефективність (Skywalker 40 A забезпечує плавне управління двигунами та мінімальний електричний шум, що особливо важливо для місій зі збору даних, де необхідна безперебійна робота.)



Рисунок 2.2 – Моторчик SunnySky X2212 KV980

Модель мотора була обрана після порівняння з аналогами, порівняння можна побачити в таблиці 2.1. SunnySky X2212 KV980 забезпечує надійність, ефективність і довговічність. Завдяки захищеній конструкції та легкій вазі він є оптимальним вибором для промислових повітряних дронів, де важлива

стабільна робота в складних умовах без втрати продуктивності. У порівнянні з аналогами цей двигун надає чудовий баланс між потужністю та енергоефективністю. Контролери швидкості (ESC) виконують роль посередників між польотним контролером та моторами, перетворюючи команди управління в електричні сигнали, що регулюють швидкість обертання ротора. Hobbywing Skywalker 40 A є популярним вибором серед розробників, оскільки забезпечує стабільну роботу при різних умовах експлуатації. Вони також мають вбудовані функції захисту від перегріву та перевантаження, що підвищує надійність системи.

Таблиця 2.1 – Порівняння обраного двигуна SunnySky X2212 KV980 з аналогами: Emax MT2213-935KV та T-Motor Air2216 KV880

Параметр	SunnySky X2212 KV980	Emax MT2213-935KV	T-Motor Air2216 KV880
КВ-рейтинг	980 KV	935 KV	880 KV
Вага	52 г	55 г	60 г
Потужність	230 Вт	210 Вт	250 Вт
Рекомендований акумулятор	3 S- 4 S	3 S- 4 S	3 S- 5 S
Конструкція	Алюмінієвий корпус, захист IP54	Алюмінієвий корпус	Магніти високої щільності
Основні переваги	Надійність ,пило та вологозахист, збалансована потужність і енергоефективність	Простота конструкції, підходить для легких дронів	Вища потужність, але менш стійкий до зовнішніх факторів

Основною перевагою системи управління моторами є можливість точного контролю обертання кожного двигуна окремо, що забезпечує високу маневреність. Це є критично важливим для виконання завдань у промисловій

сфері, де необхідно здійснювати точне позиціонування і стабільність під час виконання місій. Наприклад, при інспекції інфраструктури система може швидко змінювати висоту та напрямок польоту залежно від отриманих даних від сенсорів, таких як температурні або вологості датчики, що дозволяє точно орієнтувати апарат для виявлення дефектів або пошкоджень.

Завдяки використанню польотного контролера система управління моторами отримує дані в реальному часі про положення та орієнтацію апарату, що дозволяє здійснювати автоматичну корекцію траєкторії та забезпечувати стабільність польоту навіть при зовнішніх впливах, таких як вітер або турбулентність. Це особливо важливо при виконанні завдань, що вимагають точності, таких як обстеження великих промислових об'єктів або технічне обслуговування інфраструктури.

Вибір правильного контролера двигунів також впливає на енергетичну ефективність платформи. Точне регулювання швидкості обертання двигунів дозволяє оптимізувати споживання енергії та подовжити час автономної роботи платформи. Наприклад, зниження швидкості обертання під час стабільного польоту дозволяє економити заряд батареї, що важливо для виконання тривалих місій, таких як моніторинг великих промислових територій або інспекція технічного обладнання. Система управління моторами також включає функції самодіагностики, що дозволяють виявляти потенційні проблеми на ранніх стадіях. Це може включати моніторинг температури контролерів або стану підключення до двигунів. Своєчасне виявлення несправностей дозволяє уникнути серйозних поломок і знижує ризик відмови під час виконання важливих завдань. Крім того, завдяки можливості налаштування параметрів контролера, таких як крива газу, система може бути адаптована для виконання специфічних промислових завдань. Наприклад, для завдань, що вимагають точного контролю за висотою або швидкістю переміщення в умовах складного середовища, система може налаштовуватися для досягнення високої стабільності польоту або маневреності.

Інтеграція з навігаційними системами та системами позиціонування забезпечує точність виконання польотних завдань, що є критично важливим для промислових місій. Система управління моторами дозволяє платформі досягати заданих координат та висоти в необхідний час, що забезпечує високу точність під час виконання інспекцій, моніторингу або обслуговування технічних об'єктів. Це робить систему управління моторами важливим елементом для забезпечення ефективності та стабільності роботи автономних платформ у промисловому середовищі.

Завдяки інтеграції з системами навігації та позиціонування, система управління моторами забезпечує високу точність у виконанні польотних завдань. Вона дозволяє досягати необхідної висоти та координат у заданий час, що є критично важливим для точного землеробства. Наприклад, використання даних з GPS-модуля Ublox NEO-M8N забезпечує точність навігації до кількох сантиметрів. Система управління моторами також може бути інтегрована з алгоритмами машинного навчання, які допомагають оптимізувати польотні маршрути на основі аналізу попередніх місій. Це дозволяє покращувати ефективність збору даних та зменшувати витрати на ресурси. Такі підходи відкривають нові можливості для автоматизації виробничих процесів. Важливим аспектом системи управління моторами є забезпечення безпеки під час польоту. Використання технологій, які автоматично активують аварійні процедури, такі як авторотація або автоматичне повернення до точки запуску, може значно знизити ризики, пов'язані з експлуатацією. Це важливо не лише для збереження техніки, але й для безпеки навколишнього середовища та людей. Системи управління моторами у важкій сфері виробництва також здатні адаптуватися до різних типів навантаження. Це дозволяє використовувати один і той же апарат для виконання різних місій, таких як розпилення пестицидів або збору даних з сенсорів. Гнучкість системи управління моторами підвищує універсальність використання безпілотних платформ у промисловому секторі.

Таким чином, система управління моторами є ключовим елементом в архітектурі управління автономними повітряними системами. Вона забезпечує точність, надійність і адаптивність, що робить її важливим інструментом для сучасного виробництва з інтеграцією повітряних дронів. У поєднанні з іншими компонентами системи, такими як сенсори та навігаційні модулі, система управління моторами сприяє підвищенню ефективності виробничих процесів. Останніми, але не менш важливими компонентами є периферійні системи, які забезпечують підтримку основних функцій автономної повітряної платформи, включаючи живлення, комунікації та додаткове обладнання. Однією з ключових периферійних систем є батарейний блок, який виступає джерелом енергії для всіх компонентів апарату. У нашому випадку використовується батарея 5000 мА/год 4S LiPo (рис. 2.3), що забезпечує достатній рівень енергії для тривалих польотів і виконання місій на виробництві.



Рисунок 2.3 – Приклад батареї Turnigy 5000 мА/год 4S LiPo

В проєкті була обрана дана батарея через кращі показники порівняно з аналогами, приклад порівняння можна побачити в таблиці 2.2. Літій-

полімерні (LiPo) батареї мають кілька важливих переваг, серед яких висока енергетична щільність і низька вага. Це дозволяє зменшити масу повітряної платформи та водночас збільшити час польоту без втрати потужності. Батарея 4S означає, що вона має чотири послідовні осередки, що дозволяє подавати напругу близько 14,8 В, яка ідеально підходить для живлення компонентів, таких як польотний контролер та двигуни.

Таблиця 2.2 – Порівняння Turnigy 5000 мА/год 4S LiPo з аналогами: Tattu 5200 мА/год 4S 35 С, Zeee 4S 14,8 В 5200 мА/год 60 С та HRB 5000 мА/год 4S 50 С

Параметри	Turnigy 5000 мА/год 4S 35 С	Tattu 5200 мА/год 4S 35 С	Zeee 4S 14,8 В 5200мА/год 60 С	HRB 5000 мА/год 4S 50 С
Ємність	5000 мА/год	5200 мА/год	5200 мА/год	5000 мА/год
Кількість комірок (S)	4S (14,8 В)	4S (14,8 В)	4S (14,8 В)	4S (14,8 В)
Розрядний рейтинг (С)	35 С	35 С	60 С	50 С
Вага	550 г	570 г	560 г	580 г
Розміри	166 мм × 50 мм × 35 мм	156 мм × 48 мм × 39 мм	157 мм × 48 мм × 40 мм	155 мм × 46 мм × 40 мм
Роз'єм	XT60	XT60	Deans T Plug	XT90
Переваги Turnigy	Надійність і популярність серед моделістів. Оптимальне співвідношення ціни та якості.	Вища ємність, що трохи збільшує тривалість польоту.	Високий розрядний рейтинг , підходить для більш енергоємних завдань.	Підвищений розрядний рейтинг, для більш потужних проектів.

Продовження таблиці 2.2

Параметри	Turnigy 5000 мА/год 4S 35 С	Tattu 5200 мА/год 4S 35 С	Zeee 4S 14,8 В 5200мА/год 60 С	HRB 5000 мА/год 4S 50 С
Недоліки Turnigy	Трохи більші розміри порівняно з деякими аналогами.	Дорожча альтернатива	Вища ціна та надмірний розрядний рейтинг для легких дронів.	Тяжча, що може вплинути на час польоту

В обраній моделі варто виділити оптимальне співвідношення ціни та якості (Turnigy має репутацію доступної та надійної батареї серед моделістів. Вона забезпечує достатню тривалість польоту без зайвих витрат), розрядний рейтинг (35 С ідеально підходить для виробничих завдань, де потрібна стабільна потужність для збору даних та тривалих прольотів) та сумісність із популярними роз'ємами (використання XT60 дозволяє легко інтегрувати батарею з існуючими електронними компонентами. Помірна вага та компактні розміри: Хоча вона трохи більша за деякі аналоги, її параметри все ще дозволяють зберегти збалансовану аеродинаміку робота.)

Ще одна перевага батареї LiPo – це стабільність її роботи при високих навантаженнях. Вона може забезпечувати постійний струм для всіх компонентів системи, включаючи двигуни, які споживають велику кількість енергії під час польоту. Це особливо важливо для задач в індустріальному середовищі, які можуть вимагати тривалого часу у повітрі або швидкого набору висоти.

Периферійні системи також включають плату розподілу живлення (PDB), яка розподіляє електроенергію від батареї до інших компонентів. PDB має важливу роль у забезпеченні стабільного постачання енергії та

запобіганні перенавантаженню системи. У поєднанні з батареєю 5000 мА/год, правильно налаштована PDB забезпечує надійне живлення для всіх основних і допоміжних компонентів платформи. Незважаючи на всі переваги, батареї LiPo потребують обережного поводження та моніторингу під час використання. Важливо уникати надмірного розрядження, оскільки це може призвести до пошкодження батареї. Для цього використовуються спеціальні моніторингові системи, які дозволяють контролювати рівень заряду під час польоту, а також забезпечують можливість повернення апарату на базу, коли заряд досягає критичного рівня. Ще одним важливим аспектом периферійних систем є система охолодження. При тривалих польотах або підвищеному навантаженні на двигуни та електроніку, компоненти можуть перегріватися, що призводить до зниження продуктивності або навіть виходу з ладу. Тому багато автономних повітряних систем оснащуються системами охолодження або вентиляторами для забезпечення стабільної роботи під час тривалих місій.

Периферійні системи також включають різні засоби підключення та інтерфейси для взаємодії з іншими модулями. Це може бути, наприклад, система збереження даних на SD-карти, яка дозволяє записувати великі обсяги інформації з камер, сенсорів та інших джерел для подальшого аналізу. Збережені дані можуть бути використані для детального аналізу стану обладнання або картографування території промислових зон після завершення місії, також, периферійні системи можуть включати LED-індикатори або аудіосигнали, що допомагають оператору або автоматичній станції моніторити стан повітряної платформи під час польоту. Наприклад, світлодіоди можуть сигналізувати про низький рівень заряду батареї або інші критичні помилки в системі.

Додаткові модулі периферійних систем можуть бути використані для покращення взаємодії платформи з навколишнім середовищем. Це можуть бути, наприклад, датчики освітленості для корекції відеозйомки або додаткові сенсори, що вимірюють вологість і температуру навколишнього середовища.

Незалежно від складності системи, периферійні компоненти повинні бути добре інтегровані та протестовані для забезпечення надійної роботи платформи. Використання стандартних модулів і інтерфейсів спрощує процес інтеграції та дозволяє проводити модернізацію без значних змін у конструкції.

Загалом, периферійні системи є важливою складовою архітектури автономної повітряної платформи, оскільки вони забезпечують не тільки живлення, але й додаткові можливості для покращення ефективності та надійності системи в цілому. Вони підтримують роботу всіх основних компонентів, від польотного контролера до сенсорів і модулів зв'язку, що робить їх невід'ємною частиною успішної реалізації місій у промислових сферах.

Таким чином, периферійні системи, на кшталт батарейного блоку, є важливими для стабільної роботи платформи, адже саме вони забезпечують енергопостачання, зберігання даних і підтримку інших систем. Інтеграція таких компонентів забезпечує тривалість місій, їхню безпеку та ефективність.

2.2 Опис технологій, які використовуються для дистанційного управління повітряним дроном

Управління повітряною платформою на відстані вимагає надійних і точних технологій передачі даних та навігації. В індустріальному середовищі важливо забезпечити стабільний зв'язок між оператором та платформою для контролю польоту та виконання завдань. Технології дистанційного управління, такі як GPS та передавачі, відіграють вирішальну роль у забезпеченні точності та ефективності польотних операцій, а також можливості автономної роботи апарату в польових умовах. Правильний вибір цих компонентів дозволяє оптимізувати процес збору інформації та управління системою.

Першими технологіями для дистанційного управління у розгляді будуть модулі навігації та позиціонування, вони відіграють ключову роль в автономних системах, забезпечуючи точність та ефективність виконання завдань. Одним з основних компонентів таких систем є GPS-модуль, який відповідає за визначення координат та висоти повітряного пристрою під час польоту.

Використання сучасних GPS-модулів, таких як Ublox NEO-M8N приклад якого можна побачити на рисунку 2.4, дозволяє досягати високої точності позиціонування, що є критично важливим у промисловому секторі. Аналіз та порівняльні характеристики з аналогами можна побачити на таблиці 2.3.

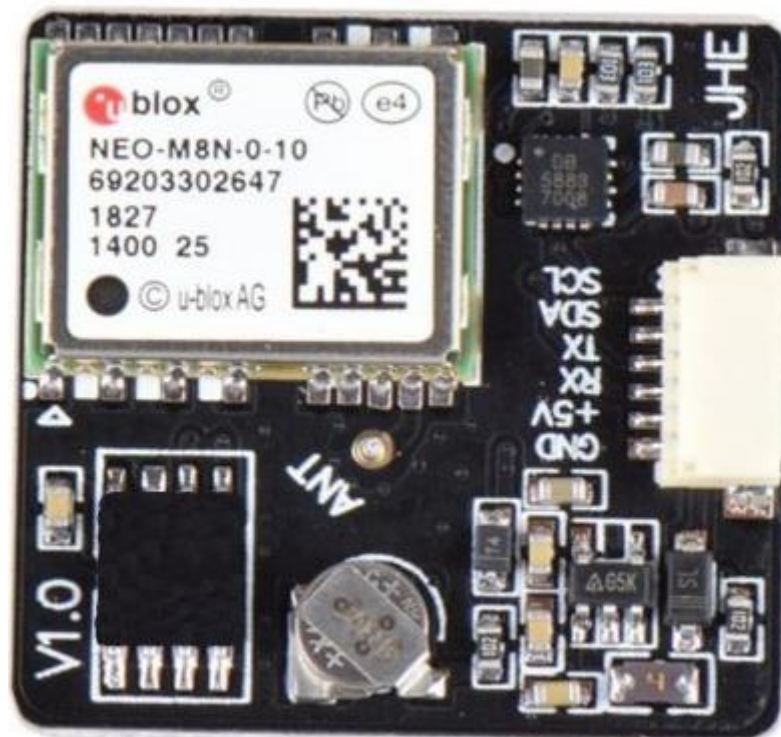


Рисунок 2.4 – GPS-модуль Ublox NEO-M8N

Цей модуль працює за принципом прийому сигналів від супутників, що дозволяє здійснювати триангуляцію для визначення місця розташування. Завдяки потужному процесору, GPS-модуль може швидко обробляти отримані дані, що забезпечує стабільне позиціонування навіть у складних

умовах. Це є важливим для виконання місій, пов'язаних із моніторингом території, оскільки точність координат дозволяє проводити детальний аналіз стану обладнання на певному місцезнаходженні.

Таблиця 2.3 – Порівняння обраної моделі Ublox NEO-M8N з аналогами: Grove GPS (Air530), Quectel L86 GPS, Adafruit Ultimate GPS

Параметр	Ublox NEO-M8N	Grove GPS (Air530)	Quectel L86 GPS	Adafruit Ultimate GPS
Точність позиціонування	2,5 м	2,5 м	2,5 м	3 м
Параметр	Ublox NEO-M8N	Grove GPS (Air530)	Quectel L86 GPS	Adafruit Ultimate GPS
Швидкість оновлення	До 10 Гц	До 5 Гц	До 10 Гц	До 10 Гц
Сумісність із супутниковими системами	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou	GPS, BeiDou	GPS, GLONASS	GPS
Споживання енергії	23 мА	31 мА	29 мА	20 мА
Переваги	Висока сумісність із GNSS-системами, висока частота оновлення	Дуже низьке енергоспоживання	Висока частота оновлення даних	Легке налаштування та інтеграція
Вага	16 г	12 г	15 г	25 г
Особливості	Ідеально для динамічних середовищ з високою точністю позиціонування	Підтримка декількох супутників одночасно	Компактний дизайн та швидкий старт	Простота інтеграції для DIY-проектів

Перевагою використання Ublox NEO-M8N є його здатність працювати з декількома системами навігації, такими як GPS, GLONASS і BeiDou. Це забезпечує підвищену надійність та точність, оскільки система може переключатися між різними супутниками в залежності від їх доступності. Таким чином, навіть у випадку втрати сигналу від одного з супутників, пристрій може продовжувати функціонувати без втрати точності позиціонування.

Одним із важливих аспектів є здатність GPS-модуля працювати в режимі реального часу, що дозволяє операторам отримувати актуальну інформацію про місцезнаходження пристрою. Це особливо корисно для моніторингу виконання завдань у промисловій сфері, коли необхідно контролювати прогрес операцій і за потреби коригувати маршрути. Реалізація функції роботи в реальному часі також є критично важливою для автоматизованих місій, де потрібна швидка реакція на зміни умов навколишнього середовища.

Модулі навігації, такі як Ublox NEO-M8N GPS, можуть інтегруватися з іншими сенсорами, наприклад, барометрами, для точного визначення висоти польоту. Це важливо для виконання інженерних операцій, адже оптимальна висота може змінюватися залежно від конкретного завдання, наприклад, інспекції інфраструктури або моніторингу стану обладнання. Поєднання GPS з іншими сенсорами забезпечує комплексний підхід до управління автономним повітряним пристроєм. Це дозволяє підвищити точність навігації, оптимізувати маршрути та зменшити ризик помилок під час виконання завдань.

Важливим аспектом є те, що GPS-модулі дозволяють здійснювати маршрутизацію та планування польотів. Це є корисним для автоматизованих місій, де важливо чітко дотримуватися заздалегідь визначених маршрутів. Завдяки GPS, пристрій може самостійно здійснювати політ, проходячи через точки, які визначені під час планування місії.

У контексті індустріальної сфери точність навігації є ключовим фактором для виконання технічних завдань, таких як моніторинг виробничого обладнання або інспекція інфраструктури. Використання сучасних GPS-модулів дозволяє операторам аналізувати дані про стан об'єктів і приймати обґрунтовані рішення щодо їх обслуговування або модернізації. Наприклад, система може ідентифікувати зони, де спостерігаються аномалії температури або механічні пошкодження, що сприяє підвищенню ефективності обслуговування та зменшенню витрат.

Переваги використання GPS у промислових додатках також включають можливість точного позиціонування для створення детальних карт місцевості. Це корисно для моніторингу великих територій, наприклад, у гірничодобувній або енергетичній сферах, де необхідно здійснювати точний контроль над обладнанням та ресурсами. Такі дані допомагають аналізувати продуктивність і планувати оптимальні маршрути для автономних пристроїв.

Одним з недоліків GPS-систем є їх чутливість до зовнішніх факторів, таких як погодні умови або перешкоди у вигляді будівель чи об'єктів.

Однак сучасні модулі, такі як Ublox NEO-M8N, завдяки вдосконаленим алгоритмам обробки сигналів та мультисмуговій технології, можуть компенсувати ці недоліки. Це робить їх надійними навіть у складних умовах експлуатації.

Крім того, GPS-модулі можна інтегрувати з геоінформаційними системами (ГІС), що дозволяє створювати детальні карти та моделі промислових об'єктів. Ці дані можуть бути використані для аналізу стану інфраструктури та планування обслуговування.

Наприклад, отримані картографічні дані дають змогу виявити ділянки, які потребують уваги, наприклад зони з підвищеним рівнем зношення або потенційними аварійними ризиками.

У результаті GPS-технології у поєднанні з іншими сенсорами та геоінформаційними системами забезпечують комплексний підхід до

управління промисловими об'єктами, підвищуючи безпеку, ефективність і точність виконання завдань.

На завершення, модулі навігації та позиціонування є критично важливими для ефективного управління автономними повітряними системами в промисловій сфері. Вони забезпечують точність, надійність і адаптивність, що дозволяє операторам швидко реагувати на зміни у виробничому середовищі. Завдяки сучасним технологіям, таким як GPS, стають доступними нові можливості для оптимізації моніторингу та обслуговування промислових об'єктів.

Наступним важливим елементом взаємодії є система передачі даних, яка забезпечує зв'язок між автономною системою та операторами або автоматизованими станціями управління. Ця система відповідає за передачу команд, даних із сенсорів і відеопотоку в реальному часі, що дозволяє здійснювати точний контроль над завданнями, такими як інспекція інфраструктури або моніторинг стану обладнання.

У нашій конфігурації використовується приймач і передавач FrSky R-XSR (рис. 2.5), які є надійним вибором для забезпечення двостороннього зв'язку.

Ця система забезпечує стабільну передачу даних навіть на великих відстанях і в умовах, де можуть бути зовнішні перешкоди. Інтеграція FrSky R-XSR зі встановленими компонентами, такими як тепловізор і сенсори, забезпечує комплексний підхід до виконання виробничих завдань.

Таким чином підвищуючи ефективність і безпеку автономних повітряних систем, що в свою чергу може позитивно впливати на ефективність процесів на виробництві, зменшувати фінансові втрати та ризики.



Рисунок 2.5 – FrSky R-XSR передавач

Однією з ключових переваг системи передачі даних є можливість оперативної обробки та обміну інформацією. FrSky R-XSR –це компактний і легкий приймач із багатими функціями, який вирізняється серед аналогів завдяки оптимальному балансу між розмірами, вагою та можливостями, детальний аналіз представлено в таблиці 2.4. Основні переваги включають підтримку телеметрії, що дозволяє в режимі реального часу отримувати інформацію про статус роботи, а також сумісність із сучасними польотними контролерами через протоколи ACCST та ACCESS. Завдяки цьому пілот може вчасно отримувати дані про стан апарату та його положення, що є критично важливим для управління. Водночас, система може передавати команди на борту, що дозволяє здійснювати точні маневри під час виконання місій.

Таблиця 2.4 – Порівняння обраного передавачу FrSky R-XSR з аналогами: TBS Crossfire Nano RX, FlySky FS-iA6B та Spektrum AR620

Параметр	FrSky R-XSR	TBS Crossfire Nano RX	FlySky FS-iA6B	Spektrum AR620
Розмір та вага	3,8 г	3 г	14 г	9 г
Дальність сигналу	До 1,5 км (у відкритій місцевості)	До 30 км (у режимі дальньої дії)	До 500 м	До 1 км
Тип радіозв'язку	ACCST / ACCESS	915 MHz	AFHDS 2A	DSMX
Телеметрія	+	+	-	-
Сумісність з контролерами	Сумісний з більшістю FC	Вимагає спеціального модуля	Сумісний з FlySky передавачами	Тільки з пристроями Spektrum
Параметр	FrSky R-XSR	TBS Crossfire Nano RX	FlySky FS-iA6B	Spektrum AR620
Особливості	Має вбудовану антену та телеметрію	Надзвичайна дальність для FPV	Доступний та простий у використанні	Просте налаштування для початківців
Кількість каналів	16	8	6	6

FrSky R-XSR підтримує технологію стабільного зв'язку, що дозволяє уникати втрат пакетів даних під час передачі. Це забезпечує стабільний та надійний зв'язок, навіть у складних умовах, таких як поривчастий вітер або електромагнітні поля. Завдяки малим розмірам приймача, його легко

інтегрувати в конструкцію, що не вплине на аеродинамічні характеристики системи та дозволяє здійснювати моніторинг в режимі реального часу. Це означає, що оператор може вчасно отримувати важливі дані, такі як рівень заряду батареї, температуру компонентів або показники роботи сенсорів. Своєчасне реагування на дані, отримані під час польоту, дозволяє уникнути проблем, таких як недостатня потужність або перегрів обладнання. Інтеграція відеокамери RunCam Split 4K у систему передачі даних забезпечує можливість отримання відеопотоку в реальному часі. Це дозволяє операторам здійснювати моніторинг стану обладнання та інфраструктури на виробничих об'єктах, отримуючи візуальну інформацію для оцінки стану та планування подальших дій. Відеодані можуть бути використані для аналізу аномалій, що є важливим для прийняття рішень у промисловій діяльності. Завдяки наявності зворотного зв'язку, система передачі даних дозволяє управляти режимами польоту в реальному часі. Оператор може змінювати параметри польоту, наприклад висоту чи швидкість, залежно від потреб завдання або зовнішніх умов, таких як пориви вітру чи зміна температурного режиму. Це забезпечує високу адаптивність і ефективність виконання завдань. Додатково, система передачі даних може бути оснащена функціями шифрування для захисту переданої інформації. Це особливо важливо під час виконання комерційних місій або у разі роботи з конфіденційними даними. Захист від несанкціонованого доступу гарантує безпеку інформації, що передається між апаратом і операторами.

Системи передачі даних також можуть використовувати телеметрію для моніторингу стану апарату в реальному часі. Це дозволяє отримувати детальні звіти про стан дрону, включаючи рівень заряду батареї, температуру, параметри польоту тощо. У разі критичних показників система може автоматично активувати аварійні процедури, такі як повернення до бази або контрольоване приземлення, що значно підвищує рівень безпеки.

Удосконалення систем передачі даних є важливим напрямком розвитку автономних платформ. Використання новітніх стандартів зв'язку, таких як

4G/5G, дозволяє досягати високої швидкості і стабільності передачі даних. Це відкриває нові можливості для виконання складних місій, наприклад інспекції виробничих об'єктів у реальному часі з детальним аналізом отриманих даних.

Гнучкість системи передачі даних дозволяє адаптувати її для різноманітних завдань у промисловій сфері. Це робить можливим використання однієї платформи для інспекції інфраструктури, моніторингу обладнання чи створення картографічних моделей територій. Система передачі даних взаємодіє з іншими компонентами, такими як сенсори та модулі навігації, забезпечуючи комплексний підхід до моніторингу і управління.

У підсумку, система передачі даних є невід'ємною частиною архітектури управління автономними повітряними системами. Вона забезпечує зворотний зв'язок між оператором і пристроєм, надає можливість використання автономних роботизованих платформ у промисловому секторі.

2.3 Вибір сенсорів для збору інформації повітряним дроном

Одним із основних завдань автономних повітряних систем у промислових застосуваннях є збір і обробка даних для моніторингу стану технічних об'єктів, таких як інфраструктура чи промислове обладнання. Важливу роль у цьому процесі відіграють спеціалізовані сенсори, такі як камери, тепловізори, лідар, які дозволяють здійснювати точне картографування територій і аналіз умов на промислових об'єктах. Ці пристрої забезпечують збір даних про стан об'єктів, температуру, вологість, наявність аномалій і інші важливі параметри, що допомагає оптимізувати експлуатацію ресурсів і підвищити ефективність роботи обладнання. Для нашої системи був обраний тепловізор Seek Thermal Compact через його високу точність і ефективність в промислових умовах, що порівняно вигідно

відрізняє його від аналогічних моделей. Детальніше оцінити переваги можна в таблиці 2.5.

Оскільки кожен тип сенсора має свої специфічні функції, важливо правильно вибрати їх відповідно до завдань, які необхідно виконати, а також до умов експлуатації на промислових об'єктах. Від ефективності роботи сенсорів залежить точність зібраних даних і їхня подальша обробка, що впливає на прийняття рішень в процесі управління та моніторингу.

Розглянемо детальніше різні типи сенсорів, що використовуються в таких системах: тепловізори для виявлення перегрівів обладнання, камери для відеоаналітики (наприклад, RunCam Split 4K для відеомоніторингу), лідар для 3D-сканування територій. Вибір конкретних типів сенсорів залежить від специфіки завдань, таких як моніторинг обладнання, інспекція інфраструктури чи виявлення температурних аномалій, що вимагають високої точності та адаптації до складних умов середовища.

Таблиця 2.5 – Порівняння RunCam Split 4 з аналогами: Caddx Turbo Micro F24 та Runcam 5 Orange

Характеристика	RunCam Split 4	Caddx Turbo Micro F24	Runcam 5 Orange
Роздільна здатність	4K – 30 fps, 1080p – 60 fps	1080p – 60 fps	4K – 30 fps
Вага	56 г	25 г	120 г
Кут огляду	160°	160°	120°
Інтерфейс	OSD, Wi-Fi, налаштування через додаток	OSD	OSD
Ціна	~\$ 55	~\$ 45	~\$ 120

Камери, такі як RunCam Split 4 (рис. 2.6), здатні знімати високоякісне відео та зображення, що дозволяє оцінювати стан апаратури та виробничого середовища.



Рисунок 2.6 – RunCam Split 4

RunCam Split 4K забезпечує високу якість зображення завдяки здатності знімати в роздільній здатності 4K при 30 кадрах на секунду. Це особливо важливо для промислових застосувань, де необхідна точність і деталізація відео для моніторингу стану технічних об'єктів.

Камера оснащена вбудованим Wi-Fi, що дозволяє зручно налаштовувати її через додаток, що робить використання камери ще простішим і доступнішим. Система OSD (On-Screen Display) виводить важливу інформацію безпосередньо на відео, що є корисним для моніторингу під час польотів або інспекційних місій. Незважаючи на те, що камера має дещо більшу вагу порівняно з іншими моделями, її характеристики виправдовують цю особливість, адже вона забезпечує оптимальну продуктивність для виконання завдань. RunCam Split 4K є гнучким варіантом, який можна використовувати в різних сценаріях – для зйомки як на землі, так і

в повітрі, що робить її універсальним інструментом для промислових застосувань.

Вона дозволяє здійснювати візуальний моніторинг, що є важливим для своєчасного виявлення проблем, таких як перегрів або дефекти обладнання, що можуть бути недоступними для візуального огляду. Завдяки високій роздільній здатності, оператори можуть детально аналізувати зображення та виявляти навіть незначні зміни в стані об'єктів.

Крім того, датчики вологості (рис. 2.7) використовуються для моніторингу рівня вологості в промислових умовах, що особливо важливо для ефективного управління водними ресурсами. Збираючи дані про рівень вологи, ці сенсори допомагають оптимізувати полив або зрошення, що підвищує ефективність і знижує витрати.



Рисунок 2.7 – Датчик вологості та температури DHT22

Сенсори вологості, що працюють у режимі реального часу, є важливим інструментом для моніторингу умов навколишнього середовища, особливо в промислових додатках, де необхідно уникати надмірного або недостатнього зволоження. Вони дозволяють дуже оперативно виявляти зміни в рівні

вологості, що важливо для збереження оптимальних умов для технічних процесів та обладнання, зокрема в системах охолодження, зрошення або зберігання матеріалів. Вчасне реагування на зміни в вологості допомагає знижувати витрати води, що є важливим для підвищення ефективності виробництва та зниження експлуатаційних витрат. Такі датчики, наприклад, в поєднанні з системами автоматичного управління, дозволяють мінімізувати людське втручання та покращити точність контролю, що може позитивно впливати на умови та якість сучасного виробництва. Було обрано даний тип через переваги у характеристиках, порівняння яких можна детально побачити в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Порівняння обраного датчика DHT22 з аналогами: DHT11 та BME280

Параметр	DHT22	DHT11	BME280
Діапазон температури	від -40 до + 125 °C	від 0 до + 50 °C	від -40 до + 85 °C
Діапазон вологості	від 0 % до 100 %	від 20 % до 90 %	від 0 % до 100 %
Точність температури	±0,5 %	±2 °C	±1 °C
Точність вологості	±2-5 %	±5 %	±1-3 %
Частота оновлення	0,5 Гц	1 Гц	0,5 Гц
Інтерфейс	Один провід	Один провід	I2C
Ціна	~10 \$	~5 \$	~10 \$

Датчики вологості та температури відіграють ключову роль у моніторингу навколишнього середовища, зокрема для оптимізації використання води в промислових процесах. Вони дозволяють отримувати

дані про вологість та температуру в реальному часі, що допомагає запобігти надмірному чи недостатньому поливу, тим самим підвищуючи ефективність використання водних ресурсів, що є критично важливим для сталого управління водними ресурсами.

Датчики температури використовуються для моніторингу кліматичних умов, особливо важливих технологічних процесів. Вони допомагають виявляти температурні коливання, що можуть впливати на продуктивність систем. Це особливо актуально в умовах змін клімату, коли важливо коригувати стратегії та адаптуватися до нових викликів. У випадку з датчиком вологості та температури DHT22, він є кращим вибором порівняно з аналогами завдяки своїм широким характеристикам, що дають змогу використовувати його в різноманітних умовах. Датчик DHT22 має значні переваги. Його діапазон вимірювання температури від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ дозволяє застосовувати його в умовах різної кліматичної складності, на відміну від DHT11, який має обмеження від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Крім того, DHT22 забезпечує більшу точність вимірювань: $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для температури та $\pm 2-5\%$ для вологості, що робить його ідеальним для застосувань, де точність даних є вирішальною. Діапазон вимірювання вологості в DHT22 становить від 0 до 100 %, що дає йому значну універсальність у різних умовах, в той час як DHT11 має обмеження від 20 % до 90 %.

Також, незважаючи на схожу частоту опитування в обох датчиків, DHT22 здатний надавати дані з меншим затриманням завдяки своїй архітектурі. Вартість цього датчика також залишається привабливою для використання в промислових проектах, що робить його доступним і популярним вибором серед фахівців. Таким чином, DHT22 є оптимальним варіантом для вимірювання температури і вологості в умовах промислового моніторингу завдяки своїм характеристикам точності, універсальності та зручності в застосуванні.

Тепловізор який вказано на рисунку 2.8 в свою чергу забезпечують вимірювання рівня температури на відповідних ділянках, що допомагає оцінити умови для роботи.



Рисунок 2.8 – Тепловізор Seek Thermal Compact

Дані про теплові аномалії, отримані за допомогою тепловізора Seek Thermal Compact, важливі для моніторингу стану промислового обладнання та виявлення потенційних проблем, таких як перегрів, до того, як вони призведуть до поломок.

Наприклад, використання тепловізорів дозволяє діагностувати електричні з'єднання, визначати місця витoku тепла або перевіряти стан механічного обладнання.

Тепловізор Seek Thermal Compact є відмінним вибором завдяки своїм численним перевагам. Детальний приклад порівняння з аналогами наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Порівняльні характеристики Seek Thermal Compact з аналогами: FLIR Lepton і FLIR Vue Pro R

Параметр	Seek Thermal Compact	FLIR Lepton	FLIR Vue Pro R
Діапазон вимірювання	від -40 °C до 330 °C	від -10 °C до 80 °C	від -40 °C до 330 °C
Тип виходу	USB (Micro-B/Type-C)	I2C	HDMI
Споживана потужність	0,9 Вт	0,6 Вт	2,8 Вт
Точність	±3 °C	±3 °C	±5 °C
Вартість	300 \$- 500 \$	250 \$- 400 \$	1,400 \$- 1,600 \$
Переваги	Компактний, мобільний	Мініатюрний, базовий	Професійна зйомка, HD

Seek Thermal Compact має широкий діапазон вимірювання температури від -40 °C до 330 °C, що дозволяє використовувати його у різних промислових умовах, включаючи виявлення перегріву в електричних системах та діагностику стану теплотрас. Завдяки високій точності з похибкою лише ±3 °C тепловізор ефективно виявляє навіть незначні теплові аномалії, що є критично важливим у чутливих до температури процесах. Його енергоефективність є ще однією перевагою – споживання потужності лише 0,9 Вт робить його ідеальним для тривалого використання на дроні з обмеженою батареєю. Компактність і мобільність пристрою, з його невеликими розмірами та вагою, дозволяють легко інтегрувати Seek Thermal

Compact на повітряний робот без негативного впливу на аеродинамічні характеристики.

У порівнянні з аналогами, наприклад FLIR Lepton, Seek Thermal Compact вирізняється більшим діапазоном вимірювання температури та зручним інтерфейсом підключення через USB, що робить його більш універсальним для інтеграції. Водночас, хоча FLIR Vue Pro R перевершує його за якістю зображення і точністю, ціна та енергоспоживання FLIR Vue Pro R значно вищі, що може бути критичним для бюджетних проєктів. Таким чином, Seek Thermal Compact є надійним, економічним і ефективним рішенням для моніторингу температури у промислових умовах. Його використання дозволяє точно і швидко виявляти теплові аномалії, інтегруючись із сучасними дронними платформами, такими як ваша. У поєднанні з іншими сенсорами, такими як датчики вологості чи температури, цей тепловізор забезпечує комплексний моніторинг для підтримки безпеки та ефективності промислових процесів.

Лідар (рис. 2.9), до прикладу, є ще одним важливим сенсором, який використовується для сканування місцевості.



Рисунок 2.9 – Benewake LiDAR TFmini Plus

У промислових застосуваннях точність збору даних є критично важливою для ефективного виконання завдань, таких як моніторинг стану обладнання, діагностика інфраструктури та проведення різноманітних інспекцій. Одним із таких інструментів є LiDAR (Light Detection and Ranging), що використовується для створення детальних карт і точного визначення відстаней до об'єктів. Завдяки технології лазерного сканування, LiDAR здатний визначати координати точок на території з високою точністю, що особливо важливо для визначення рельєфу, структури об'єктів і інших важливих параметрів.

LiDAR TFmini Plus від Benewake є одним з кращих виборів серед доступних на ринку пристроїв завдяки своїм технічним характеристикам і функціональності, приклад порівняння в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Порівняння обраного компонента Benewake LiDAR TFmini Plus з аналогом LightWare SF30/D

Параметр	Benewake LiDAR TFmini Plus	LightWare SF30/D
Точність	±5 см	±10 см
Частота вимірювання	100 Гц	100 Гц
Інтерфейс	UART, I2C	UART
Споживана потужність	0,5 Вт	1 Вт
Вартість	\$ 100	\$ 200
Особливості	Компактний розмір, легкий	Висока точність
Діапазон вимірювання	0,3 - 12 м	0,1 - 200 м

Модуль має оптимальний діапазон вимірювання від 3 м до 12 м, що робить його ідеальним для застосувань, де потрібна висока точність на коротких відстанях, таких як інспекція обладнання або картографування промислових територій. Важливими перевагами TFmini Plus є точність

вимірювання до ± 5 см, що вдвічі перевищує точність таких моделей, як LightWare SF30/D, де похибка може досягати ± 10 см. Це дозволяє отримувати більш детальні і точні дані, що необхідно для аналізу та прийняття рішень в реальному часі.

Частота вимірювання TFmini Plus складає 100 Гц, що дозволяє отримувати постійні оновлення даних і забезпечує ефективний моніторинг змін у навколишньому середовищі. Це особливо важливо для автоматизованих систем, де швидке реагування на зміни умов є критично важливим. Споживана потужність цього сенсора складає всього 0,5 Вт, що робить його енергоефективним вибором для використання в автономних системах, таких як дрони або інші безпілотні платформи, де обмежена енергія.

Компактні розміри TFmini Plus дозволяють безперешкодно інтегрувати його в різні платформи без значного впливу на вагу чи аеродинамічні характеристики пристрою. Крім того, датчик підтримує підключення через UART та I2C, що забезпечує гнучкість у використанні та сумісність з різними контролерами та іншими компонентами системи.

Інтеграція сенсорів, таких як LiDAR, з іншими типами датчиків (наприклад, датчиками температури та вологості) дозволяє створити комплексну систему моніторингу для виявлення аномалій на виробничих об'єктах або для моніторингу стану технічних систем. Використання багатофункціональних сенсорів не лише покращує точність збору даних, а й дає можливість оптимізувати різноманітні виробничі процеси, ці дані також можуть бути використані для створення моделювання і прогнозування, що дає змогу максимально точно адаптувати стратегії управління до змінних умов на промислових об'єктах. Наприклад, за допомогою даних LiDAR можна створювати точні тривимірні карти територій, що дозволяють оперативно реагувати на зміни в умовах навколишнього середовища чи інфраструктури.

Використання таких технологій у поєднанні з програмними рішеннями для аналізу даних дає змогу зменшити залежність від людського фактора, підвищити точність прийняття рішень і забезпечити більш ефективне управління ресурсами. Важливо зазначити, що завдяки інтеграції LiDAR з іншими сенсорами, такими як камери для відеоаналітики або датчики температури та вологості, можна отримати комплексну картину стану об'єктів і навколишнього середовища, що дозволяє своєчасно виявляти проблеми, прогнозувати їх розвиток і здійснювати коригування стратегії управління.

У результаті, LiDAR TFmini Plus є відмінним вибором для тих, хто потребує точних і надійних даних для вирішення інженерних задач, забезпечення безпеки і оптимізації роботи промислових систем. Його функціональність, точність, енергоефективність і зручність інтеграції роблять його ідеальним варіантом для використання в автономних системах, таких як дрони або роботизовані платформи.

2.4 Висновки до розділу 2

У підсумку можна виділити, що система управління автономними повітряними платформами є ключовим елементом для ефективного виконання різних завдань, таких як моніторинг інфраструктури, інспекція технічних об'єктів або виконання інших промислових місій. Вибір правильної архітектури цієї системи визначає її точність, стабільність і здатність працювати в автономному режимі, що є важливим для зменшення потреби в постійному контролі з боку оператора. Центральний блок управління виконуватиме роль координації роботи платформи, управління її рухами, обробки даних, що надходять від сенсорів, та виконання завдань, поставлених перед апаратом. Ця складна електронна система дає можливість приймати рішення на основі отриманої інформації та працювати в автономному режимі, що знижує потребу в постійному втручанні людини. Навігаційні системи забезпечують точне позиціонування платформи на

території. Вони дозволяють платформі точно слідувати заданому маршруту, незважаючи на зміни навколишнього середовища, такі як сильний вітер або погіршення видимості. Це дозволяє ефективно виконувати завдання, пов'язані з моніторингом об'єктів або перевіркою технічного стану інфраструктури. Модулі GPS, такі як Ublox NEO-M8N, є важливими для забезпечення точності і стабільності позиціонування, що дозволяє платформі слідувати за заданою траєкторією навіть у складних умовах. Сенсори та датчики в свою чергу виконують місію збору даних про стан об'єктів і навколишнього середовища. Камери, як RunCam Split 4K, дозволяють здійснювати візуальний моніторинг, виявляти дефекти або аномалії, що дозволяє своєчасно вжити заходів для їх усунення. Вони також можуть бути використані для збору даних про стан інфраструктури, що допомагає знизити ризики і оптимізувати обслуговування. Окрім цього, датчики температури та вологості дозволяють збирати дані про стан навколишнього середовища, що допомагає у виконанні точних інженерних завдань. Наприклад, датчик вологості та температури DHT22 дозволяє точно вимірювати ці параметри і використовувати їх для моніторингу та аналізу стану різних технічних об'єктів.

Лідар є важливим сенсором для виконання тривимірного сканування території, що дає можливість точно визначати рельєф та стан об'єктів. LiDAR TFmini Plus забезпечує точне картографування і отримання даних, що допомагає виявляти незначні зміни на поверхні або зміни в структурі об'єктів.

Система управління моторами є необхідною для виконання команд, пов'язаних із рухом платформи. Вона дозволяє забезпечити стабільність та маневреність під час виконання завдань на різних ділянках або в складних умовах, таких як нерівна поверхня чи сильний вітер. Контролери двигунів дають можливість точно реагувати на команди, що забезпечує стабільність польоту і точне виконання місій.

Системи передачі для забезпечення двостороннього зв'язку між платформою та оператором. За допомогою таких систем, як FrSky R-XSR,

можна здійснювати контроль над платформою в реальному часі, коригувати параметри в залежності від умов і отримувати дані з сенсорів без затримок. Це дозволяє безпечно і ефективно виконувати завдання на великих відстанях. Енергетична складова є важливою для автономності платформи. Вибір правильної батареї високої ємності дозволяє збільшити час роботи без необхідності підзарядки, що є важливим для виконання довготривалих місій на великих площах. Збалансоване управління енергією дозволяє ефективно використовувати ресурси та забезпечити стабільність роботи платформи.

Таким чином, інтеграція всіх цих елементів дозволяє створити ефективну та надійну автономну платформу для виконання інженерних завдань, інспекцій та моніторингу технічних об'єктів. Кожна частина системи, від навігації до сенсорів, контролерів двигунів і системи живлення, відіграє свою роль у забезпеченні стабільної та продуктивної роботи.

3 ФУНКЦІОНАЛЬНА СТРУКТУРА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ ДРОНОМ

3.1 Розробка структури системи управління повітряним дроном

Система управління повітряним дроном для виробничих цілей повинна включати в себе комплекс високотехнологічних компонентів, що забезпечують точність, надійність і ефективність виконання завдань в індустріальній сфері. Для реалізації цього проекту критично важливо, щоб кожен елемент працював узгоджено і інтегровано, створюючи єдину систему, здатну автоматично збирати та аналізувати дані, а також передавати їх для подальшої обробки та використання у виробничих процесах. Сучасні технології дозволяють інтегрувати ці компоненти в єдину структуру, що підвищує ефективність роботи дронів та забезпечує високий рівень автономності при мінімальному втручанні людини.

Основними компонентами системи є бортовий комп'ютер, сенсори, камери та інші датчики, які здійснюють моніторинг навколишнього середовища та збирають дані. У цій системі ключову роль відіграє Raspberry Pi, який є основним керуючим елементом. Завдяки високій обчислювальній потужності, можливості підключення додаткових модулів і підтримці програмних інтерфейсів, Raspberry Pi забезпечує обробку отриманих даних, управління всіма підсистемами та комунікацію з іншими компонентами. Це дозволяє інтегрувати інші пристрої, такі як GPS-модуль для визначення місцеположення, датчики температури та вологості для збору екологічних даних, а також тепловізійні камери для огляду територій і виявлення специфічних об'єктів у полі. Принципи роботи цієї системи засновані на використанні автономних алгоритмів, що адаптуються до змінюваних умов зовнішнього середовища, що дає змогу максимально ефективно використовувати дані для подальшого аналізу. Додатково, система повинна

бути спроектована так, щоб забезпечити інтерактивну комунікацію з віддаленими серверами через REST API, що дозволяє надсилати зібрану інформацію для обробки та зберігання. Це створює можливість для інтеграції з виробничими системами, забезпечуючи доступ до даних у реальному часі та швидкий аналіз для оперативного ухвалення рішень.

Забезпечення стабільної роботи таких систем вимагає ретельного планування логіки взаємодії між усіма підсистемами, продуманого розташування і підключення сенсорів та забезпечення захищеного з'єднання для передачі даних. Всі ці елементи повинні працювати разом, щоб система була надійною, ефективною та готовою до використання в умовах сучасного виробництва. Вибір платформи для управління дронів у виробничій сфері є надзвичайно важливим, адже він має вплив на ефективність, надійність і безпеку всієї системи. Raspberry Pi яка представлена на рисунку 3.1 завдяки своїй багатофункціональності та потужності, є оптимальним рішенням для таких завдань.



Рисунок 3.1 – Raspberry Pi 5

Вона забезпечує необхідні обчислювальні потужності для обробки даних, що надходять від сенсорів, камер та інших пристроїв, а також для виконання алгоритмів, які контролюють польоти і навігацію дронів. У виробничих умовах це особливо важливо, адже обробка інформації у реальному часі є необхідною умовою для безперебійної роботи та своєчасного реагування на зміни середовища.

Окрім обчислювальної потужності, Raspberry Pi пропонує широкий спектр можливостей для підключення зовнішніх пристроїв, що дозволяє створювати адаптивні рішення, які відповідають специфічним вимогам виробничих процесів. Вона підтримує різні інтерфейси, такі як GPIO, I2C, UART, що забезпечує безперешкодну інтеграцію з різноманітними модулями, включаючи GPS-модулі, тепловізійні камери, датчики температури та вологості, а також LiDAR-системи. Це, у свою чергу, дає змогу не тільки збирати інформацію, але й виконувати її аналіз і передачу на високому рівні.

Важливо зазначити, що Raspberry Pi має підтримку мов програмування, таких як Python, що забезпечує зручний інструмент для розробки спеціалізованого програмного забезпечення. Це дозволяє налаштовувати алгоритми для управління дронами, створюючи гнучкі та ефективні рішення, що відповідають умовам виробництва, де змінність і адаптація до нових завдань є ключовими.

Інтеграція REST API додає ще одну значну перевагу у використанні Raspberry Pi. REST API, завдяки своїй простоті та універсальності, дозволяє дрону взаємодіяти з іншими системами автоматизації та програмним забезпеченням, що використовується на підприємстві. Це створює можливість для інтеграції дронів у загальну екосистему виробничих процесів, забезпечуючи обмін даними в реальному часі. В результаті, оператори можуть отримувати інформацію про стан дрона, передавати команди для зміни маршрутів, налаштування сенсорів та запуску збору даних, що значно покращує рівень автоматизації та знижує потребу в людському втручанні.

REST API також забезпечує можливість віддаленого моніторингу і управління системою, що є важливим аспектом для виробничих процесів, де безперебійна робота і швидке реагування на непередбачувані ситуації мають вирішальне значення. З його допомогою дрон може не лише передавати дані на сервери для збереження та подальшого аналізу, але й отримувати нові команди від оператора без фізичної присутності на місці. Це значно підвищує ефективність управління та спрощує робочі процеси.

Однією з переваг використання REST API є його сумісність із стандартними веб-протоколами, такими як HTTP/HTTPS. Це дозволяє інтегрувати систему дронів з іншими програмними рішеннями, що вже використовуються на підприємстві, включаючи бази даних, системи моніторингу і аналітичні платформи. Таким чином, обмін даними між різними елементами інфраструктури стає зручним і ефективним, сприяючи комплексній автоматизації і підвищенню продуктивності.

Інтеграція з REST API також робить систему більш гнучкою у плані масштабування. За рахунок відкритих стандартів і простоти використання, розширення функціоналу або інтеграція з новими технологіями не вимагає значних витрат або складних змін у базовій системі. Це дозволяє оперативно адаптувати систему до змінних умов виробництва, що є важливим для підтримки її актуальності і конкурентоспроможності на ринку.

Підсумовуючи, використання Raspberry Pi разом з REST API створює оптимальну основу для створення систем управління дронами, що відповідають потребам сучасної виробничої сфери. Це рішення забезпечує необхідну обчислювальну потужність, інтеграцію з іншими системами, гнучкість у модифікаціях і можливість віддаленого управління. В результаті, система дронів з такою платформою стає ефективним інструментом для автоматизації виробничих процесів, що забезпечує високу продуктивність, надійність і безпеку.

Для ефективного виконання виробничих завдань, сучасні системи управління дронами повинні мати складну структуру, де кожен компонент

відіграє важливу роль у забезпеченні безперебійної роботи та інтеграції з іншими системами. Ця інтеграція дозволяє дрону збирати, обробляти та передавати дані, а також забезпечує стабільний і контрольований політ у реальному часі. Далі розглянемо, як кожен із ключових елементів системи взаємодіє для досягнення цієї мети. Приклад взаємодії можна побачити на рисунку 3.2.

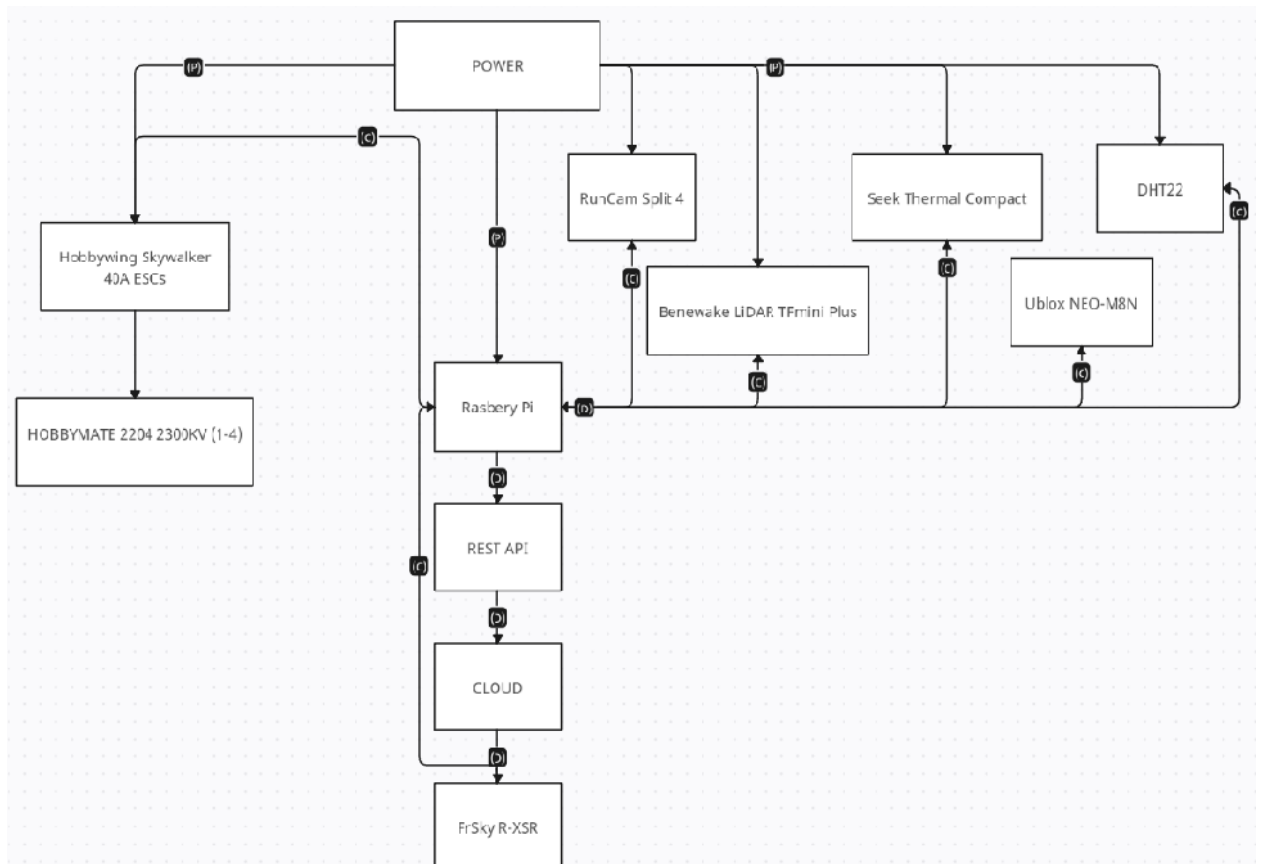


Рисунок 3.2 – Функціональна структура системи управління повітряним дроном

На рисунку 3.2: P – Power; C – Command; D – data, Для початку будемо розглядати схему передачі живлення на компоненти системи. Батарея LiPo (Turnigy 5000 мА/год 4S) є головним джерелом живлення для всіх електронних компонентів дрона. Вона підключається до розподільної плати живлення (Power Distribution Board, PDB) через роз'єм XT60, який надає міцний і надійний контакт для передачі електричного

струму. Плата PDB, у даному випадку SpeedyBee F405 B3, виконує роль не тільки розподільника живлення, але й контролера польоту, який організовує взаємодію між різними електронними системами дрона. Вхідний роз'єм "Power In" на PDB підключається до роз'ємів батареї, а виходи PDB надають живлення іншими лініями (5 В, 12 В тощо) для підключення підсистем.

ESC (Hobbywing Skywalker 40 A) підключаються до розподільної плати живлення (PDB) для отримання електричного живлення, яке необхідне для роботи моторів і системи управління. Вихід PDB, який постачає стабільне напруження 5 В або 12 В, підключається до входу живлення ESC через відповідні дроти, зазвичай використовуючи силові провідники з високою пропускнуою здатністю для уникнення втрат на довгих відрізках. ESC також підключається до роз'єму "Signal Out" PDB, що відповідає за подачу сигналів живлення до системи.

Сигнальні проводи ESC підключаються до Raspberry Pi через GPIO-порти, які використовуються для передачі PWM-сигналів (Pulse Width Modulation). Ці сигнали управляють швидкістю обертання моторів, задаючи їхню швидкість у режимі реального часу залежно від команди управління, що надходить від Raspberry Pi. PWM-сигнали з Raspberry Pi мають певну частоту і ширину імпульсів, які змінюються відповідно до введених даних і налаштувань польоту.

ESC приймає ці сигнали, інтерпретує їх і регулює потужність, яку подає на мотори, таким чином, контролюючи швидкість їхнього обертання. Кожен ESC підключається до одного з чотирьох моторів (SUNNYSKY X2212 KB980) дрона через трифазні силові дроти, що дозволяє кожному мотору обертатися незалежно для стабільного та маневреного польоту. Мотори обертаються відповідно до напрямку та швидкості, що задаються ESC, і створюють тягу, яка піднімає дрон і забезпечує його переміщення в різні боки. Додатково, ESC має захисні функції, такі як температурний захист, що запобігає перегріву, а також захист від перевантаження, який автоматично знижує вихідну потужність у разі надмірного споживання. Це допомагає

уникнути виходу з ладу електронних компонентів і підтримує надійну роботу дрона під час польоту. Мотори (SUNNYSKY X2212 KB980) підключаються до ESC за допомогою трифазних силових проводів, які забезпечують передачу електричної потужності та контролюють обертання моторів. Кожен ESC відповідає за підключення та регулювання одного мотора, але у випадку дрона з чотирма моторами, схеми підключення організуються так, щоб мотори працювали у парі: M1 з M2 і M3 з M4. Це дозволяє зберігати баланс і забезпечує рівномірне розподілення тяги для стабільного польоту.

Мотори, підключені до ESC, отримують сигнали на основі PWM, які обробляються ESC для контролю швидкості обертання. ESC підлаштовує вихідну потужність відповідно до команд, отриманих від Raspberry Pi, що дозволяє виконувати маневри та корекцію курсу дрона в режимі реального часу. Швидкість обертання моторів, регульована ESC, визначає величину тяги, яку створюють мотори, що є основною силою для підйому і переміщення дрона у різні напрямки.

Мотори працюють у парі, що дозволяє створити стабільну систему, яка компенсує обертання і забезпечує точне управління дрона. Парні конфігурації моторів (M1 з M2 і M3 з M4) працюють так, щоб протилежні мотори обертались у протилежних напрямках, що дозволяє дрону здійснювати повороти, підійматися, знижуватися і підтримувати горизонтальну стабільність під час польоту. Це співвідношення забезпечує можливість корекції будь-яких відхилень від заданої траєкторії та стабільність під час виконання складних маневрів.

Raspberry Pi є основним обчислювальним вузлом дрона, який обробляє та аналізує дані з різних сенсорів і камер, а також координує роботу всіх підсистем. Він відповідає за прийом і обробку інформації від зовнішніх датчиків і камер, виконання алгоритмів для управління польотом і комунікацію з віддаленими системами через REST API.

Raspberry Pi підключається до Power Distribution Board (PDB) для отримання живлення, використовуючи вихід 5 В або 12 В, що дозволяє йому

забезпечувати стабільне живлення для своєї роботи та підключених компонентів. Всі інші компоненти, що підключаються до Raspberry Pi, отримують живлення через спеціальний вихід 5 В PDB, що стабільно постачає електричний струм, необхідний для їхньої роботи.

Raspberry Pi підключається до ESC для управління моторною системою, що дозволяє дрону регулювати швидкість обертання моторів і забезпечувати стабільний політ. ESC, у свою чергу, отримує сигнали від Raspberry Pi, що включають PWM-сигнали для контролю швидкості обертання моторів, забезпечуючи точну реакцію на команди управління.

Щоб моніторити та адаптувати поведінку дрона в залежності від змін у навколишньому середовищі, Raspberry Pi взаємодіє з датчиком температури та вологості DHT22. Цей сенсор передає інформацію про поточні атмосферні умови, яку Raspberry Pi використовує для корекції режимів польоту та налаштування параметрів роботи інших систем.

Що стосується збору зображень і відео, Raspberry Pi підключається до камери RunCam Split 4 і тепловізора Seek Thermal Compact. Камера RunCam Split 4 забезпечує високоякісні відео та зображення у реальному часі, що використовуються для моніторингу та аналізу території. Тепловізор Seek Thermal Compact дозволяє дрону отримувати теплові зображення, що корисно для виявлення температурних аномалій, наприклад, на виробничих об'єктах для виявлення пожеж.

Raspberry Pi використовує ці дані для обробки і формування повної картини ситуації, автоматично коригуючи траєкторію польоту, налаштовуючи параметри камер і датчиків, а також забезпечуючи передачу даних через REST API на віддалений сервер чи хмарну платформу для подальшого аналізу та збереження.

Сенсор DHT22 вимірює температуру і вологість навколишнього середовища, і ці дані передаються Raspberry Pi через GPIO-порти. Raspberry Pi обробляє отриману інформацію і використовує її для адаптації поведінки дрона в залежності від умов навколишнього середовища. Тепловізор Seek

Thermal Compact підключається до Raspberry Pi через інтерфейс USB або інші підключення і отримує живлення від PDB через вихід 5 В. Цей тепловізор допомагає виявляти теплові аномалії на поверхні, що може бути корисно для моніторингу рослинності або виявлення потенційних проблем.

Камера RunCam Split 4, що підтримує HD-відеозйомку, є важливим компонентом системи збору даних дрона. Вона підключається до Raspberry Pi через відеоінтерфейс, що може бути HDMI або аналоговий інтерфейс, залежно від конфігурації дрона. Підключення через HDMI забезпечує високу якість передачі відеосигналу з мінімальними втратами, що є критично важливим для високоякісної відеозйомки. У разі використання аналогового інтерфейсу передача сигналу може мати деякі обмеження за якістю, але вимагає менше ресурсів і може бути корисною в умовах, де потрібна простота підключення.

Камера RunCam Split 4 отримує живлення від Power Distribution Board (PDB), що забезпечує стабільну подачу 5 В або 12 В для роботи. PDB розподіляє електричний струм від батареї LiPo, підключаючи камеру до основної системи живлення дрона. Це гарантує надійність роботи камери протягом усього польоту, навіть при змінному навантаженні.

Всі зняті відео- і фото-дані передаються через відеоінтерфейс до Raspberry Pi, який відповідає за їхню обробку, збереження та передачу на віддалену хмарну платформу або сервер за допомогою REST API. Raspberry Pi здійснює кодування і стискування даних, забезпечуючи ефективну передачу великої кількості інформації в реальному часі. Це дозволяє операторам отримувати відео- і фотозображення для аналізу ситуації та ухвалення рішень, а також застосовувати алгоритми комп'ютерного зору для автоматичного виявлення певних об'єктів чи аномалій на знімках.

Камера RunCam Split 4 може бути налаштована для різних режимів зйомки, включаючи захоплення фото з високою роздільною здатністю, запис відео в реальному часі та інтеграцію з іншими системами дрона для синхронізації збору даних. Це дає можливість дрону здійснювати моніторинг

території, знімати зображення для створення карт і аналізувати віддалені ділянки, що є корисним для виробничих досліджень, інспекцій інфраструктури та інших завдань, де потрібна високоякісна відео- і фотозйомка.

GPS-модуль Ublox NEO-M8N підключається до Raspberry Pi через UART або USB і отримує живлення від PDB. Дані GPS використовуються Raspberry Pi для визначення координат дрона та планування маршруту польоту, а також для корекції траєкторії польоту, що забезпечує точне позиціонування.

Лідар Benewake TFmini Plus підключається до Raspberry Pi через UART-порт для передачі даних про відстань. Входи та виходи лідару з'єднуються з портами GPIO Raspberry Pi через перехідник або адаптер для серійної комунікації. Підключення через UART дозволяє передавати інформацію про відстань у реальному часі, що допомагає дрону виявляти перешкоди, створювати карту навколишнього середовища та здійснювати корекцію траєкторії польоту для уникнення зіткнень і планування оптимального маршруту. Лідар забезпечує точні вимірювання відстані в діапазоні до кількох десятків метрів і працює з високою частотою сканування, що дозволяє швидко реагувати на зміни у середовищі.

Всі дані, зібрані камерами (RunCam Split 4), тепловізором (Seek Thermal Compact), GPS-модулем (Ublox NEO-M8N) і лідаром (Benewake TFmini Plus), надходять на Raspberry Pi для комплексної обробки. Raspberry Pi обробляє ці дані та готує інформацію для передачі на хмарну платформу через REST API, що забезпечує стабільний обмін даними між дронами та сервером. REST API дозволяє дрону передавати відео, фото, сенсорні дані та іншу інформацію, а також отримувати команди та оновлення від хмарної платформи.

Хмарна платформа отримує дані від дрона, обробляє їх, створює звіти, графіки та статистику, яку оператор може переглядати через веб-інтерфейс або API. Ці звіти можуть включати аналіз зображень, карту місцевості, інформацію про маршрут, дані про стан обладнання та інші важливі показники, необхідні для моніторингу та планування.

Приймач FrSky R-XSR підключається до Raspberry Pi через UART-порти або цифрові порти GPIO, забезпечуючи обмін даними між дроновим контролером і пультом управління. Це з'єднання дозволяє Raspberry Pi отримувати сигнали від пульта управління, що включають команди управління польотом, такі як зміна висоти, напрямку, швидкості, активація реверсування або інші маневри.

Сигнали від пульта управління надходять через протокол PWM або серійної комунікації, передаючи команди, що дозволяють оператору вручну змінювати курс дрона, що особливо важливо при необхідності точного контролю в складних ситуаціях або для використання у спеціалізованих завданнях.

Приймач також підключається до PDB для отримання живлення, яке забезпечується стабільним 5 В або 12 В від батареї LiPo через розподільну плату живлення. Це забезпечує надійне функціонування приймача, навіть у разі високих навантажень під час роботи дрона. Підключення до PDB гарантує, що приймач завжди має необхідну енергію для підтримки зв'язку з пультом управління, що є важливим для безперервного управління дрона під час польоту.

FrSky R-XSR підтримує двосторонній зв'язок між пультом управління та Raspberry Pi, дозволяючи не лише передачу команд, але й отримання даних з дрона. Це дозволяє оператору отримувати інформацію про стан дрона, такі як рівень заряду батареї, швидкість, висота та інші параметри. Завдяки цьому зв'язку можна забезпечити зворотний зв'язок, що підвищує безпеку польоту, оскільки оператор отримує повний контроль над апаратом і має можливість втрутитися в управління в разі необхідності, щоб забезпечити безпеку польоту або змінити маршрут для уникнення перешкод чи інших ситуацій.

Система FrSky R-XSR також підтримує функції безпеки, такі як failsafe, що дозволяє дрону автоматично вертатися на точку старту або приземлитися у разі втрати зв'язку з пультом управління. Це забезпечує додатковий рівень захисту, запобігаючи можливій втраті дрону або небезпечним ситуаціям,

якщо зв'язок з оператором переривається через перешкоди або інші зовнішні фактори. Визначення архітектури системи управління є ключовим етапом у розробці повітряного дрона для виробничих завдань. Основні функції цієї системи включають навігацію, виконання задач та забезпечення зворотного зв'язку. Для нашого дрона, створеного з використанням компонування, що включає контролер Pixhawk 4, GPS-модуль Ublox NEO-M8N, лідар Benewake TFmini Plus, камеру RunCam Split 4, тепловізор Seek Thermal Compact та мікрокомп'ютер Raspberry Pi, кожна з функцій має свої особливості та переваги, які забезпечують ефективність роботи в реальних умовах.

Ключовою функцією є навігація. Для забезпечення автономного польоту використовується високоточний GPS-модуль Ublox NEO-M8N, який дозволяє дрону визначати своє положення з точністю до кількох сантиметрів. Лідар Benewake TFmini Plus додає можливість оцінювати висоту та виявляти перешкоди, що особливо важливо при польотах у складній місцевості або в умовах обмеженої видимості. Ця комбінація забезпечує безпечний обліт заданих маршрутів, автоматичне уникнення перешкод і ефективне виконання польотних завдань.

Ще однією важливою функцією системи управління є виконання виробничих задач. Камера RunCam Split 4 та тепловізор Seek Thermal Compact відповідають за зйомку у звичайному та інфрачервоному спектрах, а сенсор DHT22 забезпечує моніторинг температури й вологості. Ці дані обробляються мікрокомп'ютером Raspberry Pi, що дозволяє створювати єдину систему збору, аналізу та передачі інформації. Такий підхід мінімізує затримки та гарантує високу точність виконання завдань, зокрема під час моніторингу великих сільськогосподарських угідь.

Підсумовуючи можна сказати, що функція зворотного зв'язку дозволяє оператору в будь-який момент перехоплювати управління дроном. Передавач FrSky R-XSR забезпечує стабільну та швидку передачу команд, що особливо важливо в умовах екстрених ситуацій або при необхідності оперативної зміни маршруту. Архітектура системи управління повітряного дрона побудована за

модульним принципом. Це дозволяє легко оновлювати окремі компоненти, такі як лідар або камера, без необхідності змінювати всю систему. Обрані ESC Hobbywing Skywalker 40 A забезпечують надійне живлення моторів SunnySky X2212 980 KV, які вирізняються своєю стабільністю, високою ефективністю та оптимальними показниками енергоспоживання.

3.2 Моделювання конструкції повітряного дрону

Розробка 3D-моделі є невіддільною частиною сучасного інженерного проектування та досліджень. У контексті створення повітряного дрона, 3D-моделювання забезпечує численні переваги, які сприяють ефективному плануванню, виробництву та оптимізації конструкції.

По-перше, створення 3D-моделі дозволяє отримати візуалізацію кінцевого продукту ще до його виготовлення. Це допомагає інженерам і конструкторам краще розуміти вигляд і функціональність робота. Наприклад, можна відразу визначити, як компоненти, такі як мотор, лідар, тепловізор, камера або GPS-модуль, будуть розташовані в межах рами. Це дає змогу уникнути потенційних проблем із розташуванням або взаємодією частин, зменшуючи ризик внесення змін на пізніх стадіях.

По-друге, 3D-модель слугує основою для розрахунків масо-габаритних характеристик, центру ваги та інших параметрів. Вона дозволяє визначити точний розподіл ваги між компонентами, що є критичним для повітряного дрона, оскільки неправильний баланс може негативно вплинути на його стабільність під час польоту. Завдяки моделюванню можна також проводити аналіз міцності матеріалів рами та інших деталей, оптимізуючи конструкцію для зниження ваги без втрати надійності.

Третім важливим аспектом є використання 3D-моделі для симуляцій. Сучасне програмне забезпечення дозволяє провести випробування аеродинаміки, перевірку роботи двигунів і пропелерів, аналіз температурних

навантажень та інші симуляції віртуально. Це зменшує необхідність дорогих і тривалих фізичних тестів, дозволяючи швидко коригувати проект.

Четвертий фактор полягає в тому, що 3D-модель є основою для виготовлення прототипів. Зокрема, вона дозволяє використати технології 3D-друку для створення окремих компонентів або навіть цілої рами. Це не лише зменшує витрати, а й дає змогу швидко перевірити ідеї, оцінити їх ефективність і внести зміни в реальному часі.

Крім того, 3D-моделі є важливими для спільної роботи між командами розробників. Вони полегшують комунікацію між фахівцями різних сфер, включаючи інженерів, дизайнерів, програмістів та операторів. Відкрита візуалізація конструкції дозволяє швидко вирішувати спірні питання, синхронізуючи дії всіх учасників процесу.

Ще однією перевагою є документування. 3D-моделі залишаються важливим елементом для подальшої експлуатації, обслуговування та модернізації. У майбутньому ці моделі можуть використовуватися для розробки вдосконалених версій робота або адаптації його під нові завдання.

Таким чином, створення 3D-моделі є багатофункціональним інструментом, який значно підвищує ефективність і якість процесу розробки повітряного дрона. Вона забезпечує зменшення витрат, зниження ризиків, покращення дизайну і гнучкість у роботі з конструкцією, що в цілому сприяє успішній реалізації проекту.

Для початку моделювання було обрано пропелери. Пропелер є ключовим елементом повітряного дрона, який відповідає за створення підйомної сили, необхідної для його польоту. Основний принцип роботи пропелера полягає у перетворенні обертального руху двигуна в тягу, яка дозволяє апарату підійматися, утримуватися в повітрі та маневрувати. Лопаті пропелера створюють тягу завдяки різниці тиску повітря на верхній і нижній поверхнях. Ця різниця виникає через специфічний аеродинамічний профіль лопатей, який забезпечує ефективне переміщення потоків повітря.

Оберти пропелера безпосередньо впливають на висоту та швидкість польоту. При збільшенні швидкості обертання підйомна сила зростає, що дозволяє повітряному роботу підійматися або швидше рухатися вперед. Крім того, синхронізація обертів пропелерів на різних осях апарата дозволяє змінювати його положення в просторі, забезпечуючи нахил, поворот чи стабілізацію. Наприклад, для повороту вліво чи вправо збільшується швидкість обертання пропелерів на одній стороні, тоді як на іншій стороні вона зменшується. Це створює момент, необхідний для виконання маневру.

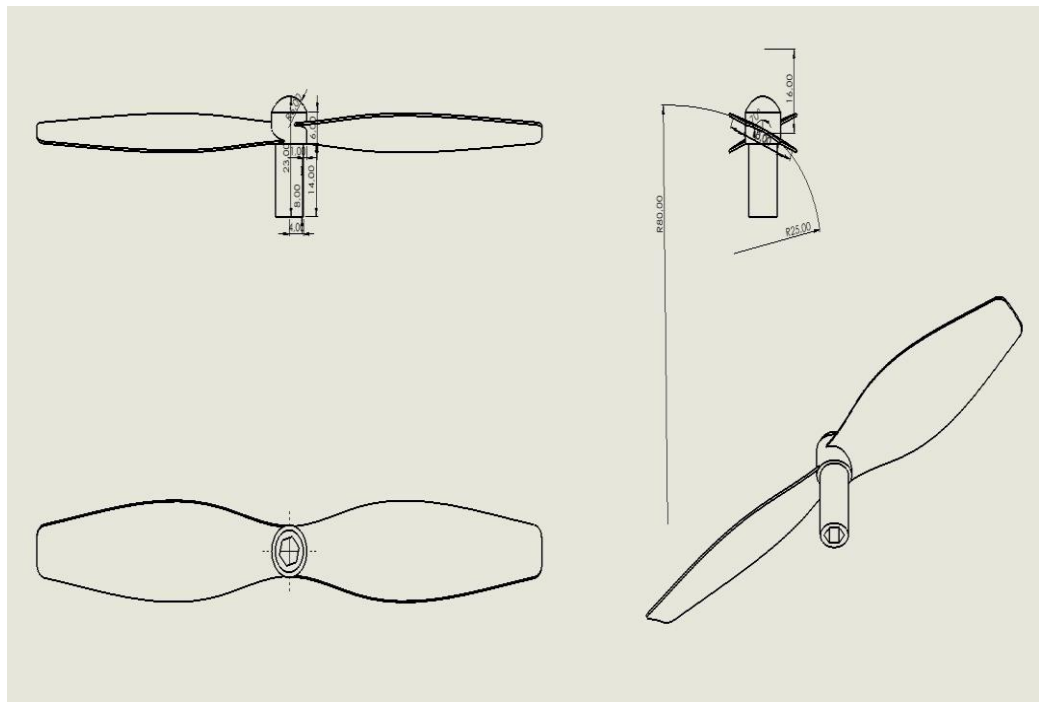
Пропелери також відіграють важливу роль у стабільності польоту. Правильне балансування забезпечує рівномірний розподіл тяги, що дозволяє уникнути вібрацій і забезпечує плавний рух. Невідбалансовані пропелери можуть спричиняти небажані коливання, які знижують точність виконання завдань і можуть призвести до пошкодження інших компонентів. Для досягнення максимальної ефективності використовують оптимізовані форми та кути нахилу лопатей, які дозволяють зменшити аеродинамічний опір і підвищити ККД (коефіцієнт корисної дії) системи.

У процесі проектування пропелерів важливо враховувати умови експлуатації. Наприклад, для роботи на великих висотах, де повітря більш розріджене, необхідно забезпечити більшу площу лопатей або збільшити їхню кількість. У той же час для апаратів, які працюють у вузьких приміщеннях або серед густої рослинності, перевагу віддають компактним пропелерам з оптимізованим співвідношенням діаметра та тяги. Залежно від типу місії вибирається відповідний пропелер, здатний забезпечити або максимальну швидкість, або підвищену вантажопідйомність.

Пропелер взаємодіє з іншими компонентами повітряного дрона, зокрема з двигуном і системою управління. Швидкість обертання контролюється електронними регуляторами швидкості, які отримують сигнали від системи управління. Це дозволяє точно регулювати тягу для виконання складних маневрів, наприклад, зависання на місці або польоту по заданій траєкторії. Крім того, на етапі моделювання проводиться аналіз

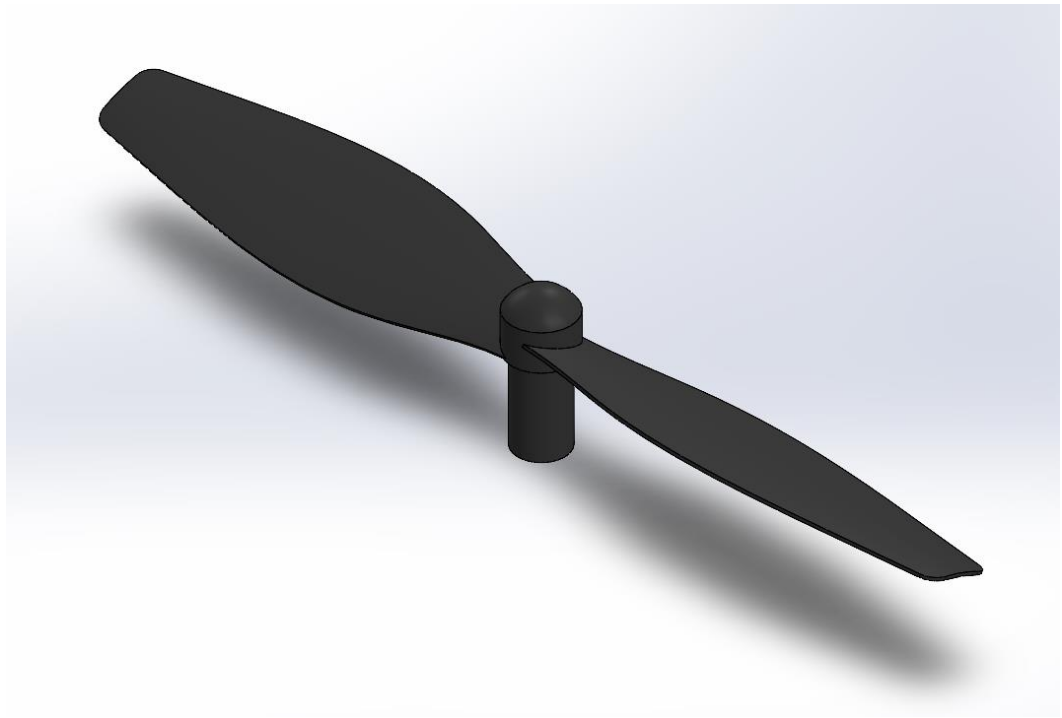
впливу пропелерів на загальну продуктивність апарата. За допомогою програмного забезпечення, такого як SolidWorks, можна моделювати поведінку пропелера в реальних умовах, оцінюючи ефективність його роботи при різних швидкостях обертання та зовнішніх факторах, таких як вітер або перепади температур.

Таким чином, пропелер є основним компонентом, який забезпечує повітряному роботу здатність літати, маневрувати й виконувати поставлені задачі. Його ефективність і точність роботи мають вирішальне значення для досягнення стабільності, продуктивності й надійності всієї системи. Приклад розробленого пропелера можна побачити на рисунку 3.3.



а)

Рисунок 3.3 – Приклад створення пропелера: а) схематичне зображення; б) твердотіле моделювання, аркуш 1



б)

Рисунок 3.3, аркуш 2

На наступному етапі можна переходити до моделювання моторчика повітряного дрона, приклад можна побачити на рисунку 3.4. Моторчик є ключовим елементом системи приводу повітряного дрона, який перетворює електричну енергію на механічну, забезпечуючи обертання пропелерів. Від характеристик моторчика залежить ефективність роботи всієї системи, стабільність польоту, маневреність і витрати енергії. Зазвичай у повітряних дронах використовують безколекторні двигуни (Brushless DC Motors, BLDC), оскільки вони мають високу ефективність, тривалий термін служби та забезпечують необхідну потужність.

Основна функція моторчика – генерувати крутний момент, який обертає пропелер. Завдяки цьому створюється підйомна сила, що дозволяє апарату підніматися в повітря, а також здійснювати необхідні маневри. Кількість моторчиків на повітряному роботі залежить від його конструкції: квадрокоптери оснащені чотирма двигунами, гексакоптери – шістьма, а октакоптери – вісьмома. Розташування моторчиків забезпечує рівномірний розподіл тяги, необхідний для стабільного польоту.

Однією з ключових характеристик моторчика є його KV-рейтинг, який вказує на кількість обертів двигуна за хвилину при подачі одного вольту без навантаження. Наприклад, двигун з рейтингом 2300KV обертатиметься на 2300 обертів за хвилину при напрузі 1 В. Моторчики з високим KV забезпечують більшу швидкість обертання пропелера, але вимагають використання менших пропелерів. Натомість двигуни з низьким KV підходять для великих пропелерів і забезпечують більшу тягу, що важливо для важких апаратів.

Ефективність моторчика значною мірою залежить від якості його компонентів, таких як обмотка, магніти та підшипники. Сучасні безколекторні двигуни оснащені потужними неодимовими магнітами, які забезпечують високу щільність потужності. Обмотка мідного дроту формує електромагнітне поле, яке взаємодіє з магнітами, створюючи крутний момент. Підшипники забезпечують плавність обертання й зменшують механічні втрати.

Моторчики працюють у парі з електронними регуляторами швидкості (ESC), які керують подачею електроенергії до двигуна. Регулятори отримують сигнали від контролера польоту, що дозволяє точно змінювати швидкість обертання моторчика залежно від команд оператора або автоматичного режиму. Це важливо для виконання таких завдань, як стабілізація в польоті, зависання або різкі маневри.

На етапі проектування повітряного дрона важливо правильно підібрати моторчики, враховуючи масу апарата, діаметр і крок пропелерів, а також параметри акумулятора. Занадто слабкий двигун може не забезпечити достатньої тяги, тоді як надто потужний призведе до перевитрат енергії та зменшення часу польоту. Додатково слід враховувати умови експлуатації. Для польотів у складних погодних умовах (наприклад, сильний вітер) обирають двигуни з підвищеною потужністю, які здатні компенсувати зовнішні впливи.

У процесі моделювання моторчика використовуються спеціалізовані програми, які дозволяють оцінити його продуктивність у симуляціях

реальних умов. Наприклад, можна проаналізувати, як двигун буде взаємодіяти з іншими компонентами системи, чи не виникне перегрів, та як обертання пропелера вплине на аеродинаміку. Завдяки цьому можна оптимізувати конструкцію та досягти максимального ККД.

Таким чином, моторчик (рис. 3.4) є важливою складовою повітряного дрона, яка забезпечує його основну функціональність. Від правильного вибору й налаштування цього елемента залежить ефективність, стабільність і тривалість польоту.

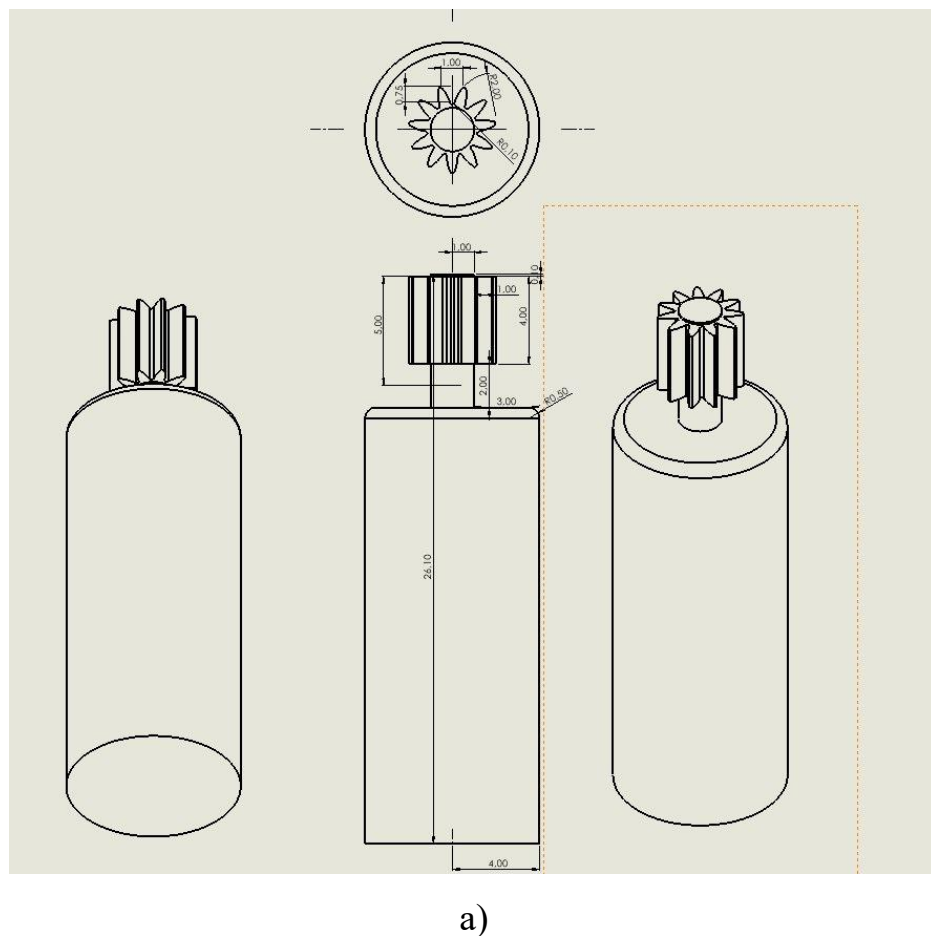
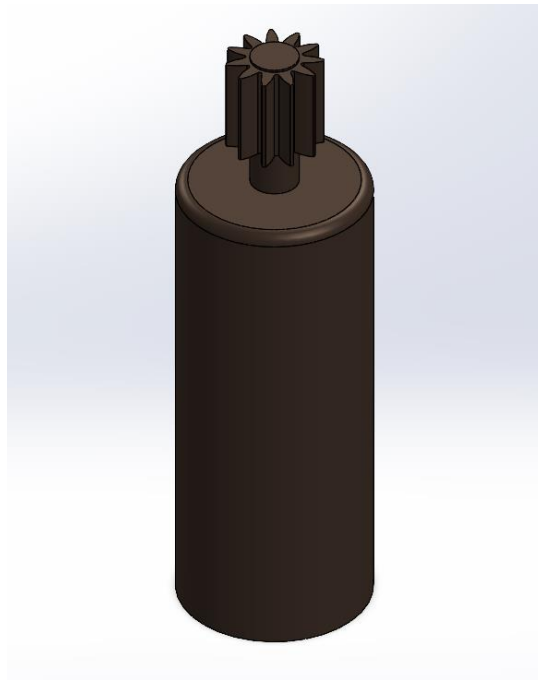


Рисунок 3.4 – Приклад створення моторчика: а) схематичне зображення; б) твердотіле моделювання, аркуш 1



б)

Рисунок 3.4, аркуш 2

Для функціонування було також додано роторний вал, приклад якого є на рисунку 3.5. Ротор є центральною частиною рухомої системи повітряного дрона, яка забезпечує передачу крутного моменту від моторчика до пропелера. Він виконує роль з'єднувального вузла між двигуном і лопатями пропелера, дозволяючи обертати їх з необхідною швидкістю для створення тяги. У більшості сучасних повітряних дронів ротор включає декілька основних компонентів: вал, підшипники, а також кріплення для пропелера.

Основна функція ротора – стабільне передавання енергії обертання від двигуна до пропелера. Це досягається завдяки високоточній конструкції, яка мінімізує втрати енергії та забезпечує ефективність усієї системи. Ротор також відповідає за зменшення вібрацій, які можуть виникати під час роботи двигуна або при швидкому обертанні пропелера. Для цього використовуються підшипники, які забезпечують плавний рух і знижують тертя між рухомими частинами.

Однією з ключових характеристик ротора є його здатність витримувати високі оберти. У повітряних дронах швидкість обертання може досягати

десятків тисяч обертів за хвилину, тому ротор повинен бути достатньо міцним і надійним. Неправильно спроектований ротор може призвести до зниження стабільності польоту або навіть до поломки системи в критичних умовах. Крім того, ротор має бути збалансованим, оскільки навіть невеликі відхилення в його вазі чи формі можуть спричинити дисбаланс, який вплине на роботу всієї системи.

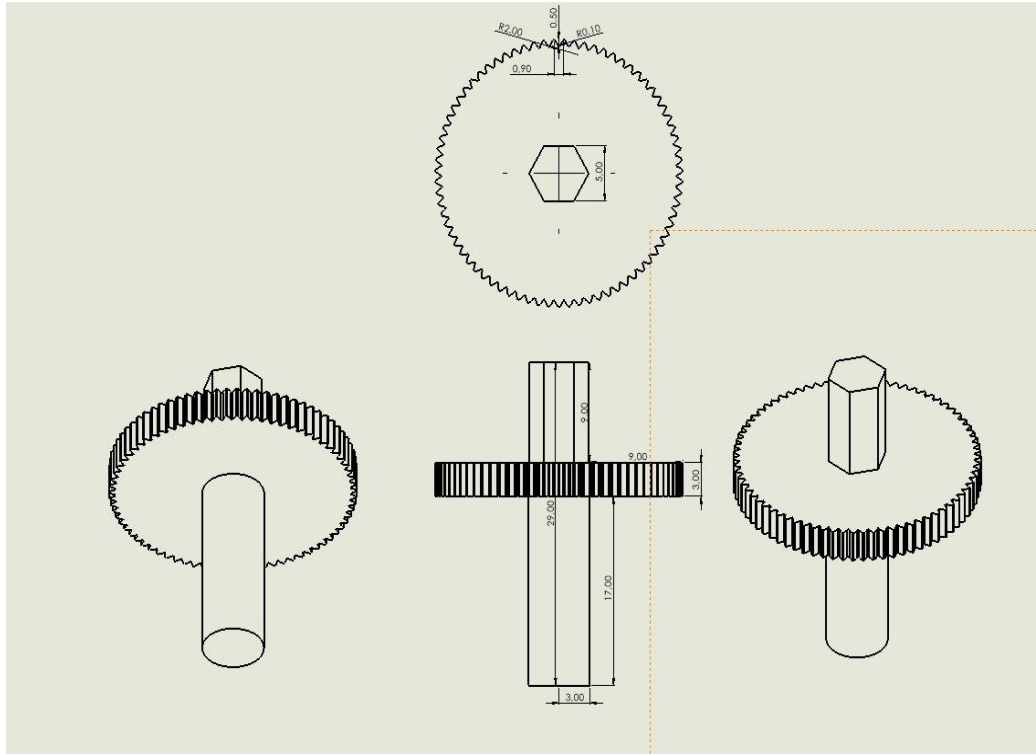
У системі повітряного дрона ротор забезпечує не лише передачу енергії, але й взаємодію з іншими компонентами, такими як електронний регулятор швидкості (ESC) та контролер польоту. Швидкість обертання ротора залежить від сигналів, що надходять від регулятора, який, у свою чергу, отримує команди від контролера польоту. Ця взаємодія дозволяє забезпечити точне управління апаратом, включаючи зміну напрямку та висоти польоту.

Ротор також виконує важливу роль у забезпеченні безпеки. Для цього передбачаються спеціальні механізми кріплення пропелера, які запобігають його від'єднанню під час роботи. Деякі сучасні системи оснащені швидко знімними роторами, які дозволяють швидко замінювати пропелери в разі їх пошкодження. Це особливо важливо в польових умовах, де необхідно мінімізувати час на обслуговування.

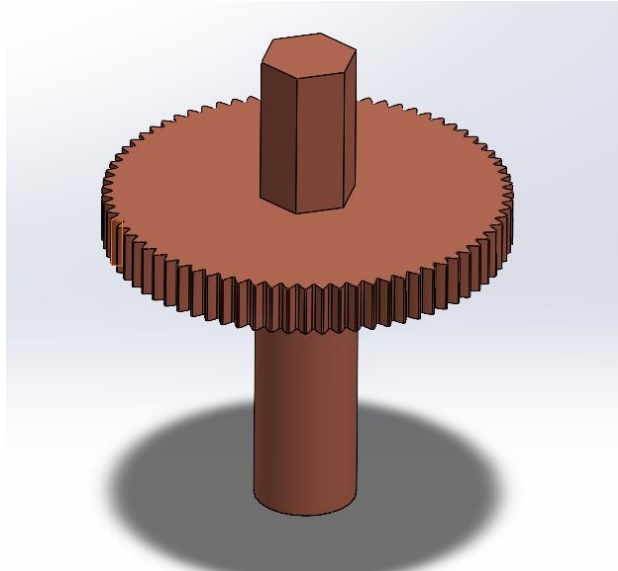
На етапі моделювання ротора важливо враховувати його взаємодію з іншими компонентами. Використовуючи програмне забезпечення, таке як SolidWorks, можна проаналізувати напруження в матеріалі ротора під час обертання, оцінити можливість виникнення деформацій і визначити оптимальні розміри та форму деталей. Також можна провести аналіз аеродинамічних характеристик, оскільки ротор, разом із пропелером, безпосередньо впливає на створення тяги та поведінку апарата в повітрі.

Ротор є одним із ключових компонентів, які забезпечують ефективну роботу повітряного дрона. Його якість і точність виготовлення безпосередньо впливають на стабільність польоту, маневреність і тривалість експлуатації

апарата. Завдяки правильному проектуванню та налаштуванню цього елемента можна значно покращити загальну продуктивність системи.



а)



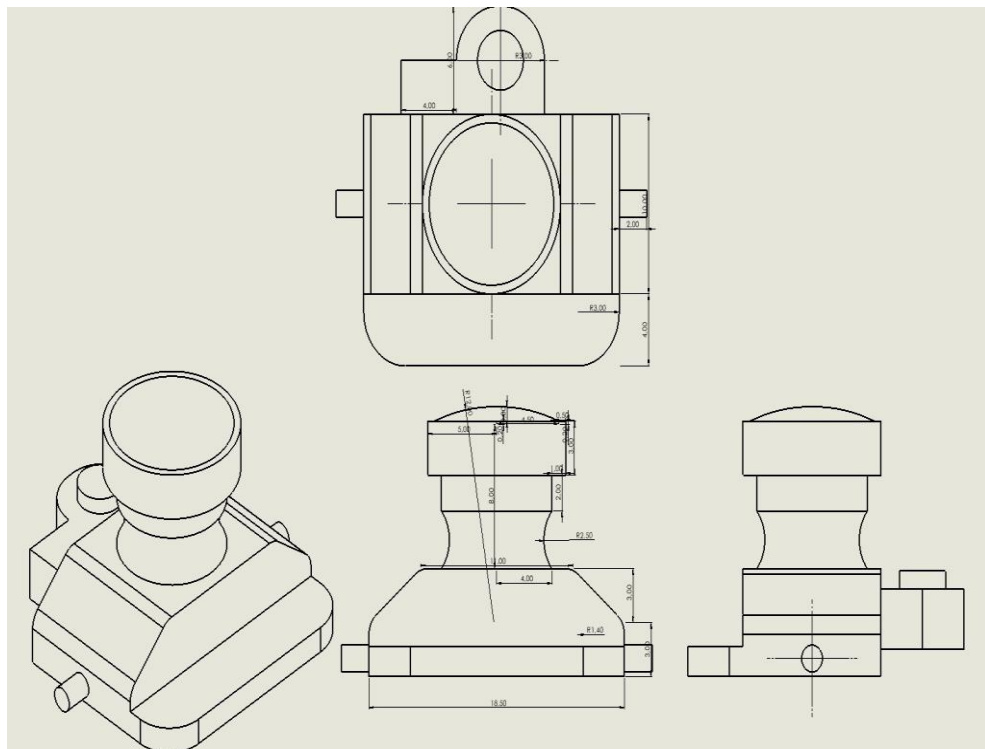
б)

Рисунок 3.5 – Приклад створення роторного валу: а) схематичне зображення; б) твердотіле моделювання

Наступним буде розроблений сенсорний блок на якому буде розміщена камера, тепловізор та лідар, приклад можна побачити на рисунку 3.7. Блок камери на повітряному дроні, що використовується у виробничій сфері, виконує ключову роль у забезпеченні високоточного збору візуальних даних. Це може включати контроль якості продукції, моніторинг обладнання, відстеження процесів у важкодоступних зонах або створення точних карт і схем виробничих територій. Основною задачею блоку камери в цьому контексті є надання актуальної та достовірної інформації для оптимізації виробничих процесів і підвищення їх ефективності.

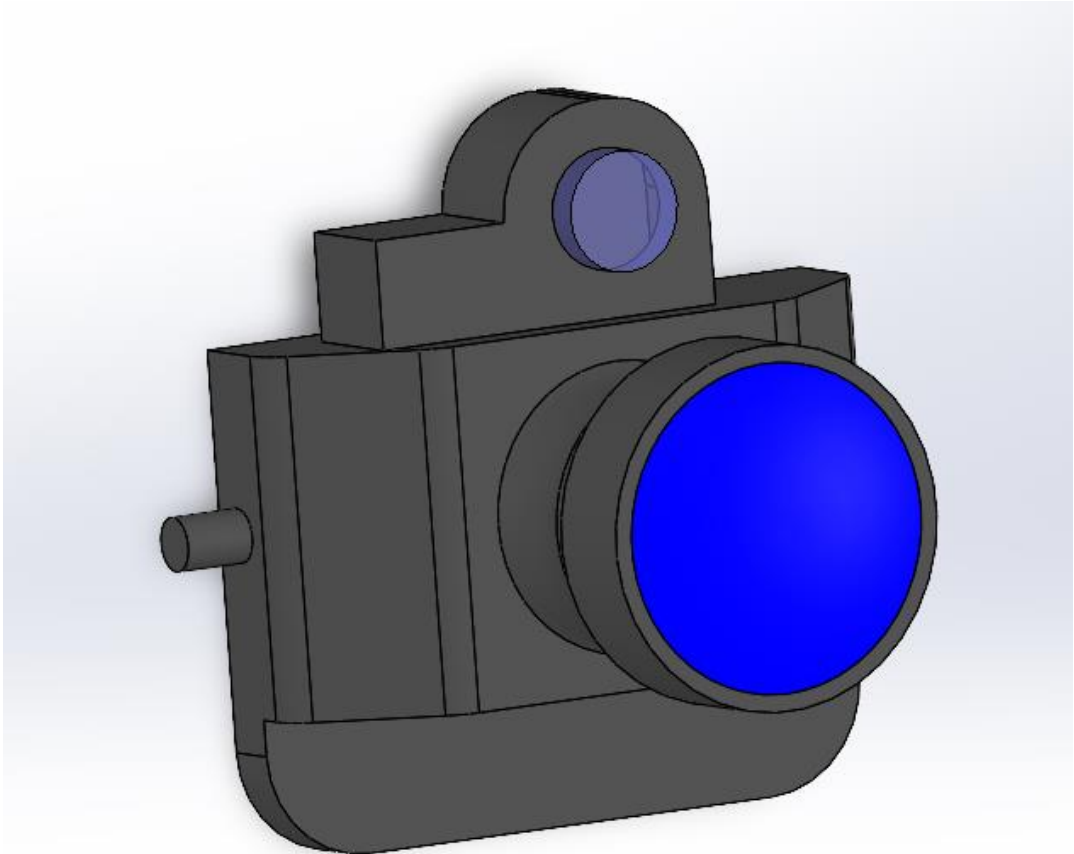
Одна з найпоширеніших задач блоку камери у виробничій сфері – моніторинг стану обладнання та інфраструктури. Камера, закріплена на повітряному дроні, дозволяє проводити візуальні інспекції трубопроводів, резервуарів, дахів, складних конструкцій та інших об'єктів, які важко або небезпечно обстежувати вручну. Це особливо важливо для раннього виявлення пошкоджень, витоків чи зносу, що дозволяє уникнути серйозних аварій і скоротити витрати на ремонт. Крім того, блок камери використовується для контролю якості продукції на виробництві. Зокрема, зображення або відео можуть бути аналізовані для виявлення дефектів, відхилень у розмірах або формі продукції, перевірки правильності маркування або складання. Завдяки використанню алгоритмів комп'ютерного зору камера може автоматично розпізнавати проблеми й передавати дані для подальшого коригування процесу. Ще однією важливою функцією блоку камери є створення цифрових моделей виробничих об'єктів. Камера дозволяє отримувати високоточні зображення, які використовуються для генерації 3D-моделей. Це може бути корисно для реконструкції виробничих майданчиків, планування розміщення нового обладнання або оптимізації логістичних процесів. Блок камери також застосовується для моніторингу робочих процесів у реальному часі. Наприклад, оператор може спостерігати за роботою складальних ліній, рухом механізмів або транспортних засобів, не покидаючи диспетчерського пункту. Це сприяє підвищенню рівня безпеки й дозволяє швидше реагувати на непередбачувані ситуації. У випадках, коли

виробничий процес відбувається в екстремальних умовах (наприклад, високі температури, вологість або хімічно агресивне середовище), камера може працювати як засіб дистанційного контролю. Завдяки цьому оператори можуть знижувати ризик для свого здоров'я й уникати прямого контакту з небезпечними середовищами. Для зручності використання блок камери може підтримувати бездротову передачу даних у реальному часі. Це забезпечує швидкий доступ до зображень або відео з будь-якого місця. У разі необхідності дані також можуть бути збережені на борту для подальшого аналізу. Отже, блок камери у виробничій сфері виконує широкий спектр задач, спрямованих на підвищення точності, ефективності й безпеки виробничих процесів. Завдяки інтеграції сучасних технологій, таких як комп'ютерний зір і дистанційна передача даних, цей компонент дозволяє суттєво розширити функціональні можливості повітряного дрона й сприяє оптимізації роботи на виробництві.



a)

Рисунок 3.7 – Приклад створення сенсорного блоку: а) схематичне зображення; б) твердотіле моделювання, аркуш 1



б)

Рисунок 3.7, аркуш 2

Тепловізор є одним із найважливіших компонентів повітряного дрона у виробничій сфері. Його головна задача – збирання теплових даних для аналізу температурного стану об’єктів, зон чи процесів. Тепловізор працює у спектрі інфрачервоного випромінювання, що дозволяє виявляти відмінності у температурах об’єктів і створювати теплові карти, які наочно демонструють стан інфраструктури чи обладнання.

У виробничій сфері тепловізор використовується для моніторингу обладнання. Це особливо важливо для раннього виявлення аномалій, таких як перегрівання, яке може свідчити про несправність або зношення компонентів. Наприклад, за допомогою тепловізора можна виявити підвищення температури у вузлах електрообладнання, двигунах чи підшипниках, що

дозволяє своєчасно провести технічне обслуговування й уникнути зупинки виробничого процесу.

Ще однією ключовою задачею тепловізора є контроль за енергоефективністю виробництва. Він дозволяє виявляти втрати тепла через недостатню ізоляцію, витоки пари або гарячого повітря. Ця інформація може бути використана для оптимізації енергетичних систем і зменшення витрат.

Тепловізор також активно використовується для перевірки стану трубопроводів, резервуарів і складних конструкцій. Наприклад, за допомогою тепловізійного зображення можна виявити місця витоків або зони, де є небезпека корозії чи пошкодження. Для підприємств, які працюють із небезпечними чи токсичними речовинами, тепловізор забезпечує можливість моніторингу без ризику для працівників.

У задачах моніторингу виробничих процесів тепловізор може використовуватися для відстеження зон з високою температурою або швидким її коливанням. Це може бути корисним для контролю таких процесів, як зварювання, плавлення чи сушіння матеріалів. Тепловізор дозволяє отримати детальні теплові профілі, що допомагають аналізувати ефективність технологічного процесу й підвищувати його точність.

Однією з переваг використання тепловізора є можливість роботи у складних умовах, таких як недостатнє освітлення, задимленість чи пил. Це робить його незамінним інструментом для виробничих підприємств, де звичайна оптична камера може бути неефективною.

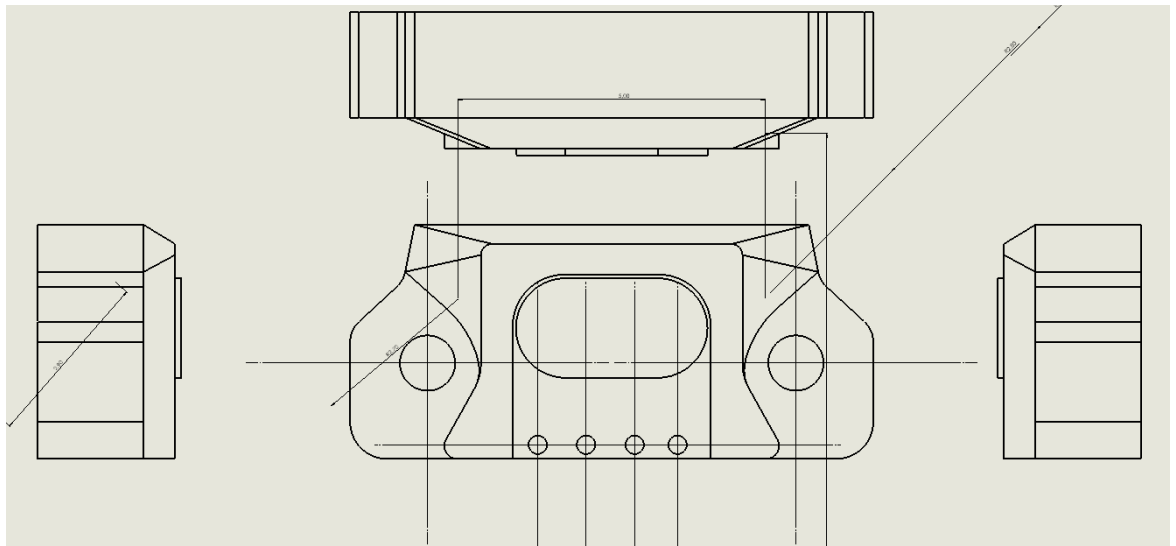
Дані, отримані з тепловізора, можуть передаватися оператору в реальному часі або зберігатися для подальшого аналізу. Сучасні тепловізори оснащені функціями автоматичного аналізу зображень, що дозволяє швидко визначати проблемні зони без необхідності постійного контролю з боку оператора.

У проектуванні повітряного дрона з тепловізором важливо врахувати його розташування, щоб забезпечити оптимальний огляд без впливу інших

компонентів. Захист тепловізора від механічних пошкоджень, пилу й вологи також є важливим аспектом, особливо у виробничих умовах.

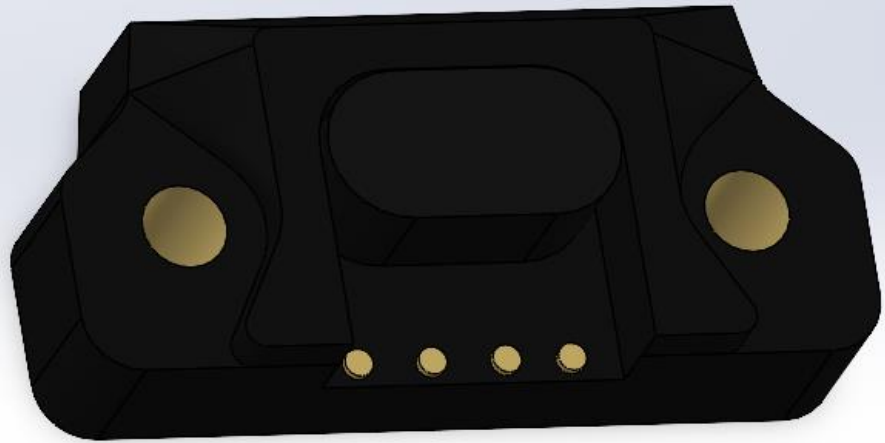
Тепловізор є важливим інструментом для забезпечення безперервності виробничих процесів, підвищення безпеки й оптимізації витрат. Його використання дозволяє виявляти проблеми на ранніх стадіях, знижуючи ризик аварій та зупинок виробництва. У поєднанні з іншими компонентами повітряного дрона тепловізор розширює його функціональні можливості, роблячи цей інструмент незамінним у сучасному виробництві.

Не варто також забувати за лідар, приклад на рисунку 3.8.



а)

Рисунок 3.8 – Приклад створення лідара: а) схематичне зображення; б) твердотіле моделювання, аркуш 1



б)

Рисунок 3.8, аркуш 2

Лідар є ще одним важливим компонентом повітряного дрона, який використовується для точної дистанційної зйомки та картографії. Ця технологія, заснована на використанні лазерного випромінювання для визначення відстаней до об'єктів, що дозволяє створювати точні 3D карти місцевості та об'єктів навколо дрона. Лідар використовує лазерні імпульси, які відбиваються від об'єктів і повертаються до сенсора, що дозволяє визначити їх точну відстань і геометрію. Цей пристрій забезпечує високу точність вимірювань, що є критичним для завдань, що вимагають детальної топографії та моделювання простору.

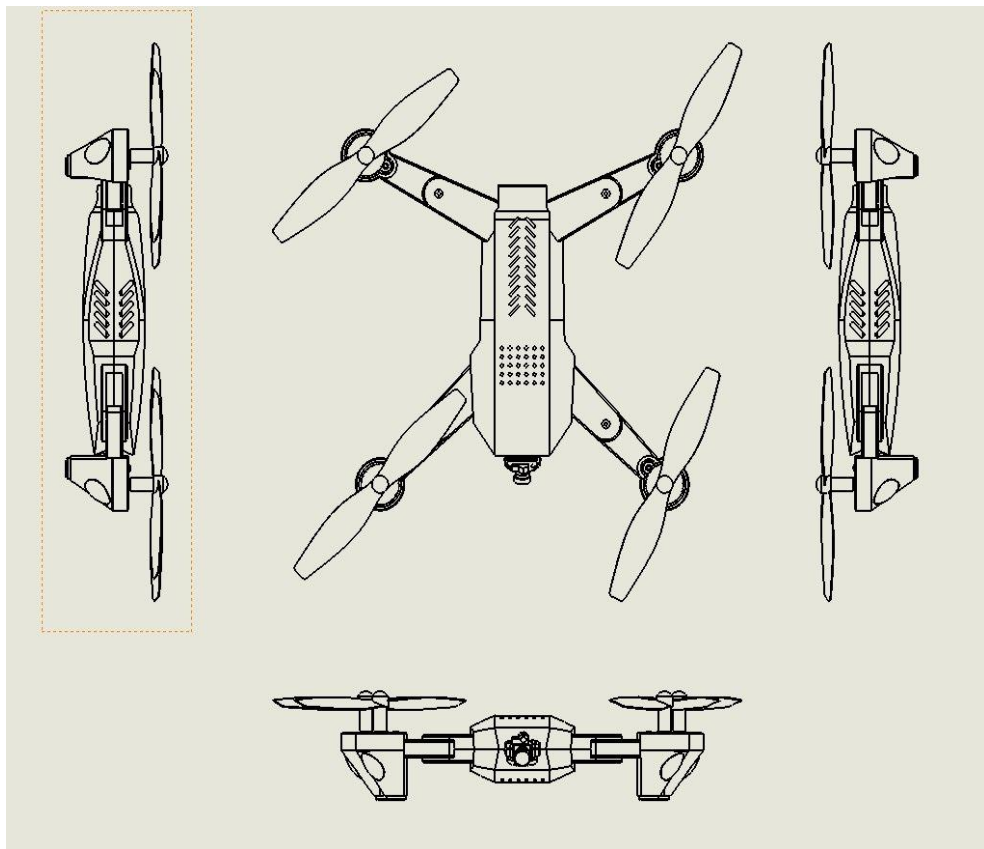
У виробничій сфері лідар використовують для виконання широкого спектру завдань, зокрема для створення цифрових моделей виробничих приміщень, складів, цехів і виробничих ліній. З його допомогою можна створювати точні 3D моделі інфраструктури, що дозволяє оптимізувати

просторове планування, зменшити кількість неефективних операцій і покращити логістичні процеси. Лідар здатен забезпечити точне відображення всіх елементів простору, таких як стіни, стелі, стелажі, машини та інші конструкції, що дозволяє краще спланувати розміщення нового обладнання або провести модернізацію без необхідності фізичних вимірювань.

Лідар активно застосовується для моніторингу і обслуговування складних інженерних систем. Наприклад, на виробничих підприємствах, де важливо точно виявляти деформації конструкцій, зміни в геометрії будівельних елементів або зміщення трубопроводів, лідар дозволяє оперативної отримати інформацію про поточний стан об'єкта в 3D. Цей пристрій дозволяє проводити регулярні інспекції без потреби зупиняти виробничий процес або використовувати складні ручні методи вимірювання. У задачах безпеки лідар може бути використаний для створення детальних карт небезпечних зон, таких як зони з підвищеним рівнем радіації або токсичних газів, для допомоги у навігації дрона в таких умовах. Оскільки лідар здатний працювати в умовах низької освітленості або навіть в темряві, він є важливим інструментом для забезпечення безпеки роботизованих систем, що працюють у важкодоступних місцях.

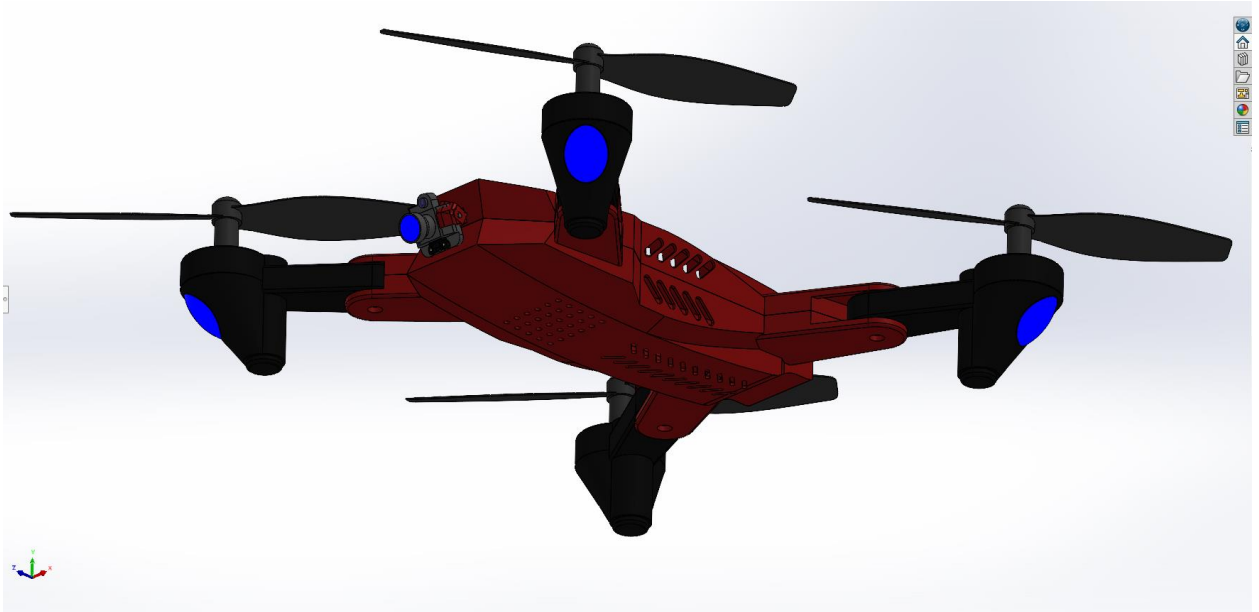
Лідар також застосовується в автоматичних системах управління на підприємствах для точного позиціонування та навігації дронів і транспортних засобів. За допомогою лазерних датчиків можна точно визначити відстань до об'єктів, що дозволяє дрону орієнтуватися в просторі, обходити перешкоди та виконувати різноманітні завдання, такі як транспортування матеріалів, складування або перевезення. Ще однією важливою перевагою лідару є здатність вимірювати відстані до об'єктів із високою швидкістю. Це дозволяє здійснювати моніторинг в реальному часі, що особливо важливо для виконання завдань, які вимагають оперативного збору даних для подальшого аналізу. Лідар дозволяє повітряному дрону швидко і точно сканувати великі площі і здійснювати карту в деталях, що робить його дуже корисним для картографії, а також для моніторингу змін у виробничому середовищі

протягом часу. У процесі розробки повітряного дрону з лідаром важливо врахувати вимоги до потужності та енергоефективності. Лідар є енергозатратним компонентом, тому необхідно спроектувати його таким чином, щоб забезпечити баланс між його енергоспоживанням і часом автономної роботи дрону. Також важливо врахувати точність і частоту сканування, що безпосередньо впливає на якість отримуваних даних і ефективність виконуваних задач. Отже, лідар є потужним інструментом для виконання точних вимірювань та створення 3D моделей у виробничій сфері. Використання лідара на повітряному дроні відкриває нові можливості для автоматизації процесів, забезпечення безпеки та підвищення ефективності виробничих операцій. Фінальну версію розробленої моделі можна побачити на рисунку 3.9.



а)

Рисунок 3.9 – Приклад фінальної версії дрона: а) схематичне зображення; б) твердотіле моделювання, аркуш 1



б)

Рисунок 3.9, аркуш 2

Підсумовуючи фінальну версію зборки повітряного дрону, можна відзначити, що кожен з компонентів відіграє важливу роль у забезпеченні його ефективності та надійності при виконанні різноманітних завдань у виробничій сфері. Кожен елемент, від пропелера до блоку камери та сенсорів, був ретельно підібраний і інтегрований для досягнення оптимальної продуктивності та функціональності. Було забезпечено невелику вагу, що також є великим плюсом для повітряних дронів (рис. 3.10).

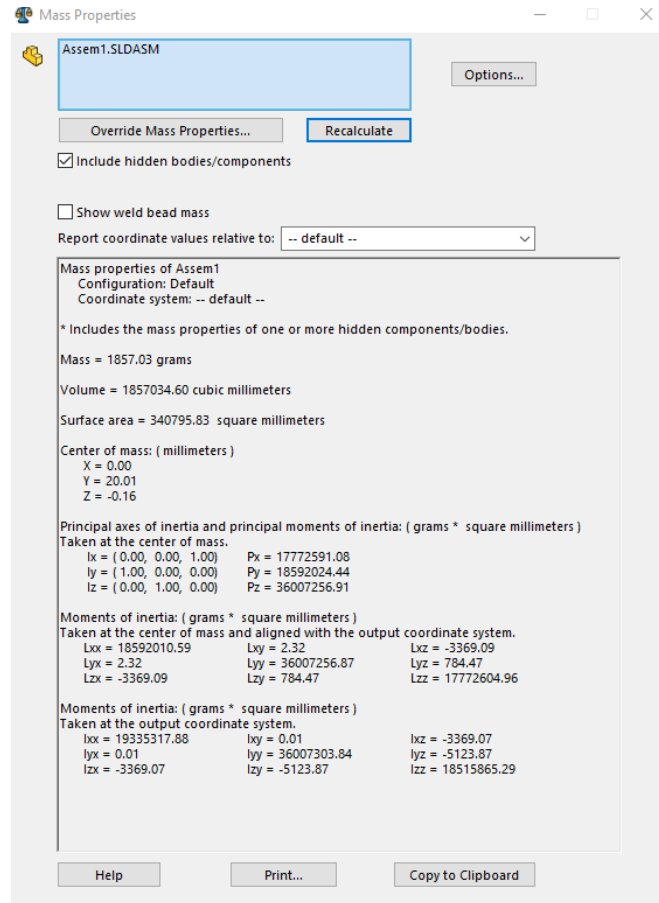


Рисунок 3.10 – Калькуляція ваги повітряного дрона

Пропелер забезпечує необхідну тягу для стабільного польоту, а також ефективно реагує на зміну навантаження завдяки оптимальній геометрії та матеріалам. Вибір мотора та пропелера визначає здатність дрона підтримувати необхідну швидкість і маневреність під час виконання завдань.

Моторчик і ротор працюють у тандемі для забезпечення стабільної тяги та контролю за польотом. Вони забезпечують необхідну потужність і маневреність, що особливо важливо для виконання точних рухів, таких як обхід перешкод або точне позиціонування в просторі.

Корпус повітряного дрона був розроблений з урахуванням необхідності забезпечення стійкості до зовнішніх впливів, таких як волога, пил і температурні зміни. Важливою частиною є система захисту всіх внутрішніх компонентів, включаючи блок камери, який розташовано так, щоб забезпечити якісну зйомку з мінімальними перешкодами.

Камера, яка встановлена на блоці, дозволяє здійснювати візуальний моніторинг процесів та об'єктів, зокрема для перевірки якості продукції, інспекції обладнання та складів, а також для навігації дрону. Стабілізація зображення гарантує чіткість даних, що знімаються під час руху дрону.

Тепловізор надає можливість здійснювати моніторинг температури об'єктів і процесів у виробничому середовищі, допомагаючи у виявленні проблем на ранніх стадіях, таких як перегрівання або пошкодження обладнання.

Лідар дозволяє будувати точні 3D карти місцевості і допомагає в навігації дрона, а також у створенні топографічних моделей виробничих приміщень для подальшого аналізу та оптимізації виробничих процесів.

Усі ці компоненти інтегруються в єдину систему управління, що використовує Raspberry Pi як центральний контролер, який відповідає за обробку даних і управління дронами. Використання REST API дозволяє забезпечити гнучкість і можливість дистанційного управління та моніторингу.

У висновку можна зазначити, що фінальна версія повітряного дрону є «потужним інструментом» для виконання завдань у виробничій сфері, зокрема для моніторингу, обслуговування обладнання, перевірки стану виробничих процесів, а також для забезпечення безпеки та оптимізації логістичних операцій. Цей дрон може бути ефективно використаний для регулярних інспекцій, автоматизації процесів і зниження людських помилок, що робить його незамінним у сучасному виробництві.

3.3 Визначення енергоспоживання повітряного дрону

Визначення енергоспоживання повітряного дрону є важливим етапом у процесі його проектування та аналізу технічних характеристик. Ефективне управління енергоресурсами дозволяє не лише забезпечити стабільність

роботи системи, а й впливає на якість виконання місії, автономність польотів та надійність у реальних умовах експлуатації.

Цей розділ присвячено детальному аналізу споживання енергії всіма основними компонентами повітряного дрона, такими як двигуни, контролери швидкості, сенсори, камера, система зв'язку та центральний обчислювальний модуль. Поряд із цим досліджується вплив параметрів батареї, наприклад, ємності та напруги, на загальну тривалість роботи. Окрім базових розрахунків, розглядаються аспекти оптимізації енергоспоживання через використання енергоефективних комплектуючих, вибір режимів роботи для окремих підсистем та баланс між продуктивністю і споживанням. Результати цих досліджень створюють основу для формування практичних рекомендацій щодо покращення енергетичної ефективності повітряного дрону.

Таким чином, у цьому розділі детально описуються методи оцінки енергоспоживання, обґрунтовується вибір технічних рішень та подаються результати, які можуть бути використані для вдосконалення розробки повітряних дронів у різних сферах застосування.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати покрокові розрахунки, враховуючи характеристики батареї, моторів, контролерів швидкості, сенсорів та інших компонентів. Для розрахунків використовуються всі компоненти повітряного дрону, а саме:

- батарея Turnigy 5000 мА/год 4S LiPo (14,8 В, 5000 мА·год);
- мотори SunnySky X2212 980КВ (4 штуки);
- регулятори швидкості (ESC) Hobbywing Skywalker 40A;
- камера RunCam Split 4;
- тепловізор Seek Thermal Compact;
- лідар Benewake LiDAR TFmini Plus;
- GPS-модуль Ublox NEO-M8N;
- приймач FrSky R-XSR;
- обчислювальний модуль Raspberry Pi.

Час польоту T визначається за формулою:

$$T = \frac{cv\eta}{P_{\text{заг}}}, \quad (3.1)$$

де C – ємність батареї (А·год);

V – напруга батареї (В);

η – ефективність системи (прийнято 80 %, тобто $\eta = 0,8$);

$P_{\text{заг}}$ – сумарна потужність споживання всіх компонентів.

Розрахуємо споживання всіх моторів $P_{\text{мот}}$:

$$P_{\text{мот}} = P_{\text{м}} \cdot 4 = 8 \cdot 4 = 32 \text{ Вт}, \quad (3.2)$$

де $P_{\text{м}}$ – споживання одного моторчика;

4 – кількість моторчиків.

Варто враховувати, що для кожного моторчика застосовується контролер швидкості і відповідно P_{esc} :

$$P_{\text{esc}} = P_e \cdot 4 = 3 \cdot 4 = 12 \text{ Вт}, \quad (3.3)$$

де P_e – споживання одного контролера швидкості;

4 – кількість контролерів швидкості.

Для розрахунку $P_{\text{заг}}$ нам потрібно вирахувати енергоспоживання всіх елементів системи за формулою:

$$P_{\text{заг}} = \sum P_i, \quad (3.3)$$

$$P_{\text{заг}} = 32 + 12 + 3 + 2 + 0,5 + 5 + 0,5 = 55 \text{ Вт}. \quad (3.4)$$

Підставляючи значення у формулу (3.1) отримаємо приблизний час автономної роботи T :

$$T = \frac{cv\eta}{P_{\text{заг}}} = \frac{5 \cdot 14,8 \cdot 0,8}{55} = \frac{59,2}{55} = 1,07 \text{ години} \approx 64 \text{ хвилини.}$$

Розрахунковий час польоту у 64 хвилини є оптимальним показником для обраної конфігурації, оскільки він дозволяє повітряному дрону ефективно виконувати широкий спектр виробничих завдань. Такий показник забезпечує можливість проведення довготривалих місій, включаючи моніторинг територій, інспекцію обладнання, тепловізійне обстеження або збирання даних з датчиків. Значна тривалість польоту дозволяє мінімізувати кількість перерв на заміну батарей або підзарядку, що особливо важливо для завдань у віддалених районах або в умовах обмеженого доступу до інфраструктури. Можливість виконувати кілька завдань за один виліт знижує операційні витрати, скорочуючи необхідність повторних запусків та економлячи час операторів. Такий час польоту також відкриває можливість виконання місій на більших територіях або завдань, які потребують детального обстеження чи складних маневрів, наприклад, збирання точних даних для аналізу.

3.4 Експериментальні дослідження

Як експертне дослідження було обрано проведення симуляції у програмному забезпеченні SolidWorks 2021, а саме CFD-аналіз повітряного дрону. Цей метод чисельного моделювання в механіці рідин дозволяє отримати глибоке розуміння аеродинамічних характеристик дрону, що має суттєвий вплив на його ефективність, стабільність та енергоефективність. CFD дозволяє провести симуляцію потоків повітря навколо конструкції дрону, що дає змогу точно оцінити вплив різних факторів на його роботу. Використання CFD-аналізу в SolidWorks допомагає отримати дані про повітряний опір, турбулентність, а також ефективність роботи компонентів,

таких як ротори та пропелери. Це дозволяє здійснювати корекції на етапі проектування, щоб забезпечити оптимальну продуктивність без необхідності створювати численні фізичні прототипи, що економить час і ресурси.

Одним з головних переваг використання CFD-аналізу є можливість оцінки аеродинамічних характеристик дрону до його виготовлення. Замість того, щоб створювати дорогі прототипи для тестування, інженери можуть за допомогою програмного забезпечення швидко отримати точні результати про потоки повітря навколо конструкції та передбачити проблеми, які можуть виникнути під час реальних польотів. Наприклад, можна визначити, де виникає надмірний аеродинамічний опір, що сприяє підвищеним енергетичним витратам і знижує час автономної роботи дрону. Також можна виявити проблеми з турбулентністю, які можуть вплинути на стабільність дрону в польоті.

Основною метою CFD-аналізу є покращення аеродинамічних характеристик конструкції дрону. Завдяки симуляціям можна оцінити, як повітря рухається навколо кожного елемента конструкції, від корпусу до ротора. Це дозволяє оптимізувати форму та розташування частин, таких як пропелери, щоб зменшити опір і зберегти стабільність польоту. В результаті можна значно покращити ефективність роботи дрону, забезпечивши кращу тягу і менші витрати енергії. Оптимізація конструкції на етапі проектування дозволяє досягти максимального часу роботи дрону без додаткових витрат на паливо чи заряджання батареї.

CFD-аналіз також дозволяє оцінити температуру різних частин конструкції дрону, що є важливим аспектом для запобігання перегріву компонентів. Дрони оснащені потужними електронними компонентами та моторами, які можуть нагріватися під час роботи. Якщо температура досягне критичного рівня, це може призвести до поломки або зниження ефективності роботи. За допомогою CFD можна виявити проблеми з тепловідведенням і забезпечити необхідне охолодження для важливих частин дрону, таких як електроніка або двигуни.

Однією з ключових характеристик, яку дозволяє оцінити CFD-аналіз, є аеродинамічний опір. Це важлива величина, оскільки опір повітря є основним чинником, що впливає на енергоефективність дрону. Знижений опір забезпечує менші енергетичні витрати та більший час польоту. Завдяки CFD можна побачити, де саме виникають зони високого опору і як їх можна мінімізувати шляхом зміни форми або розташування частин конструкції. Це дозволяє створювати більш ефективні дрони, що використовують менше енергії для досягнення тих же результатів.

Крім того, CFD-аналіз дає можливість виявити зони турбулентності, які можуть спричиняти нестабільність під час польоту. Турбулентні потоки можуть негативно впливати на керованість дрону, знижувати його маневреність і здатність підтримувати стабільний політ. Визначення місць, де виникають ці турбулентності, дозволяє внести зміни в конструкцію дрону, щоб зменшити їх вплив. Наприклад, можна оптимізувати форму корпусу або змінити кут атаки лопатей ротора для зменшення турбулентних потоків.

Ще одним важливим аспектом є оцінка ефективності роторної системи. CFD дозволяє точно моделювати, як потоки повітря взаємодіють з роторами, а також оцінити їх здатність генерувати достатню кількість підйомної сили для підтримки польоту. Це важливо для забезпечення стабільності та маневреності дрону, а також для зменшення енергетичних витрат. Завдяки цьому можна оптимізувати конструкцію лопатей і ротора для забезпечення більшої тяги при менших енергетичних витратах.

Процес проведення CFD-аналізу за допомогою SolidWorks включає кілька етапів. Спочатку потрібно створити точну 3D-модель дрону в SolidWorks. Важливо, щоб модель була максимально деталізованою, включаючи всі компоненти, такі як корпус, пропелери, роторна система, камера та інші елементи. Після створення моделі необхідно визначити параметри симуляції, зокрема швидкість повітряного потоку, температуру і вологість. В залежності від умов польоту можуть бути визначені різні параметри, такі як різні швидкості вітру або температурні коливання.

Наступним кроком є запуск симуляції. SolidWorks Flow Simulation здійснює симуляцію потоків повітря навколо дрону, що дозволяє побачити, як повітря рухається і взаємодіє з конструкцією. На основі цих результатів можна оцінити аеродинамічні характеристики дрону, виявити зони високого опору та турбулентності, а також визначити, як зміни в конструкції впливають на загальну ефективність дрону.

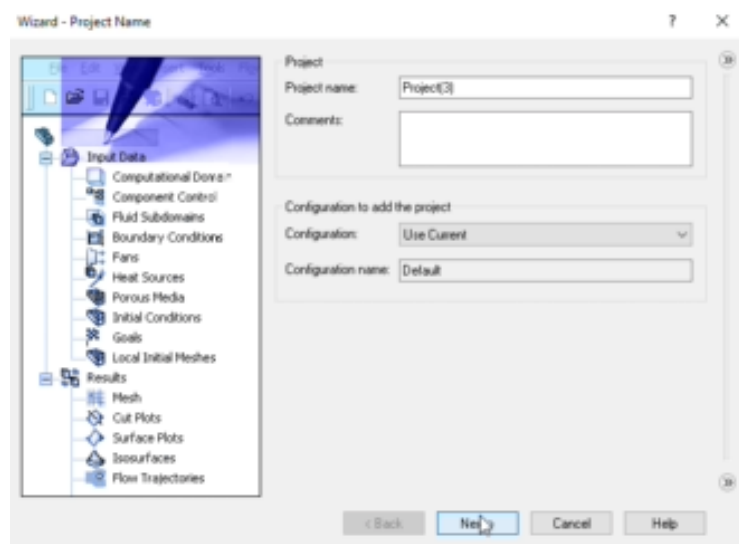
Після проведення симуляції важливо ретельно аналізувати отримані результати. Це дозволяє зробити висновки про те, які частини конструкції потребують оптимізації. Наприклад, можна виявити, що форма корпусу або розташування пропелерів призводять до надмірного аеродинамічного опору. У такому випадку можна внести зміни в модель, зменшивши опір або покращивши стабільність. Також можна провести додаткові симуляції, змінюючи параметри, щоб визначити, як різні умови впливають на поведінку дрону.

Завдяки використанню CFD-аналізу в SolidWorks, проектування RC дрону стає більш ефективним і точним процесом. Всі зміни, які можуть бути внесені на етапі проектування, допомагають уникнути проблем з аеродинамікою, стабільністю та енергоефективністю в реальних умовах польоту. Крім того, CFD дозволяє виявити можливі проблеми з тепловим режимом, що важливо для запобігання перегріву компонентів. Завдяки цьому інженери можуть створити більш надійний і ефективний дрон, що має менші енергетичні витрати, кращу маневреність і стабільність в польоті.

Висновки щодо важливості CFD-аналізу для проектування RC дронів очевидні: цей метод допомагає покращити аеродинамічні характеристики, знизити енергетичні витрати, оптимізувати роботу роторної системи та уникнути проблем з перегрівом. В кінцевому підсумку, це дозволяє створити більш ефективні дрони з кращими характеристиками, що дозволяє покращити їх продуктивність і час автономної роботи. Використання CFD-аналізу є необхідним етапом у розробці сучасних безпілотних літальних

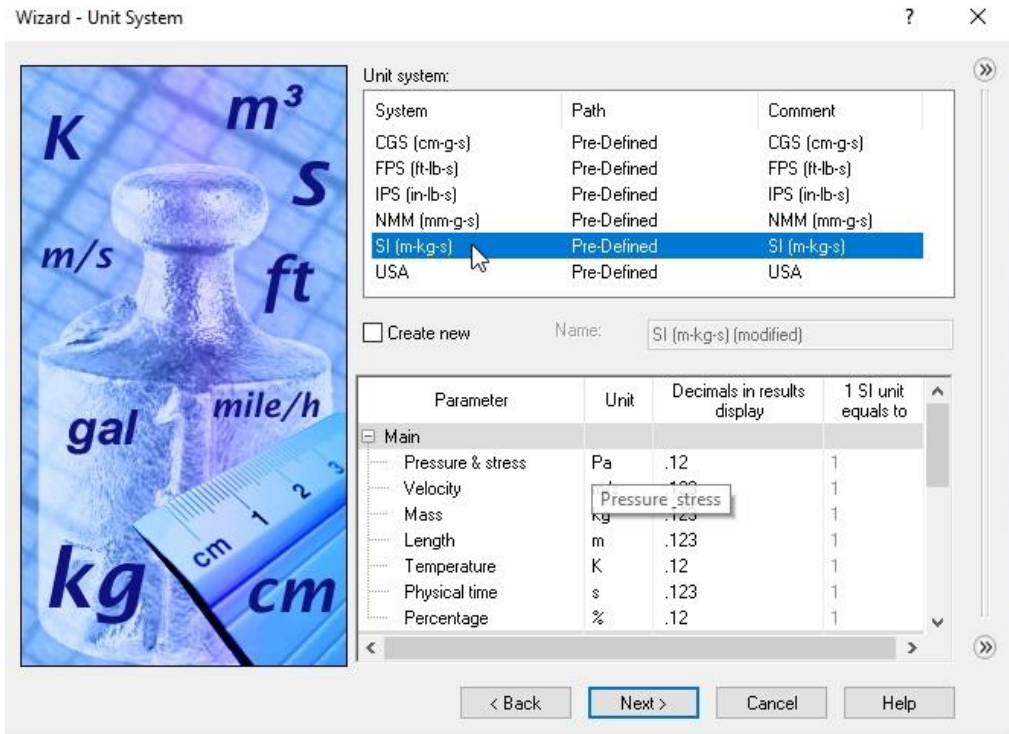
апаратів і допомагає забезпечити їх високу ефективність і надійність в реальних умовах експлуатації.

Для початку роботи створимо новий проект в інструменті Flow Simulations та задамо необхідні налаштування та параметри, а саме врахування гравітації, вологості та повітря (рис. 3.11).

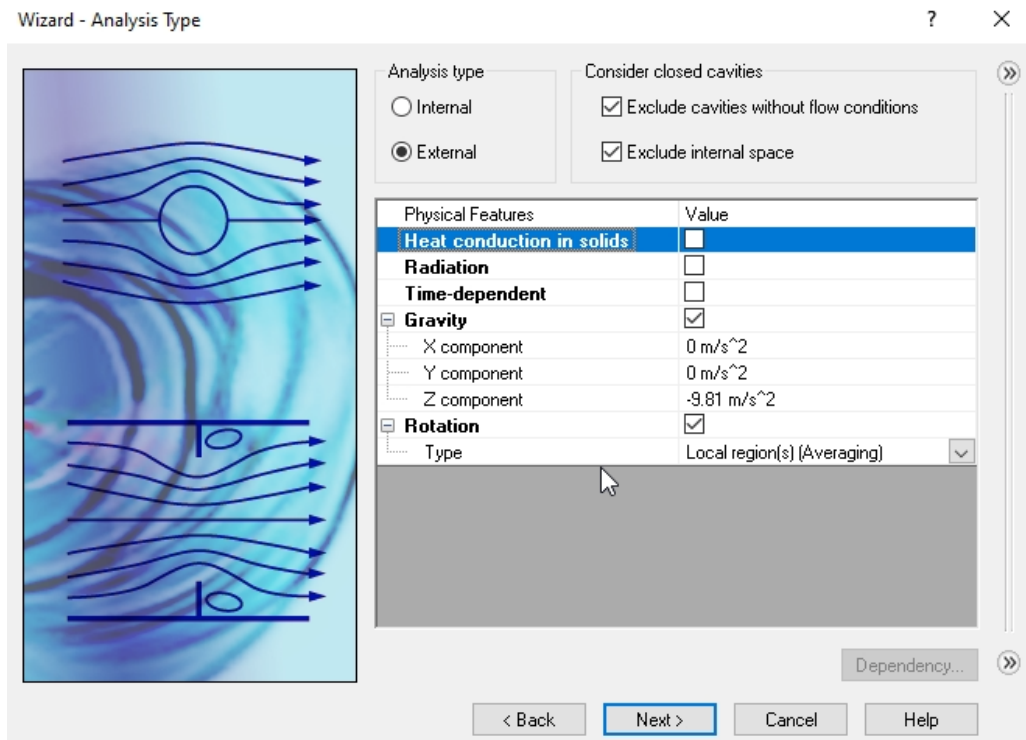


а)

Рисунок 3.11 – Приклад програмних налаштувань для проведення симуляцій: а) створення проекту; б) вибір системи одиниць; в) додавання гравітації та обертання елементів; г) додавання врахування повітря та вологості, аркуш 1

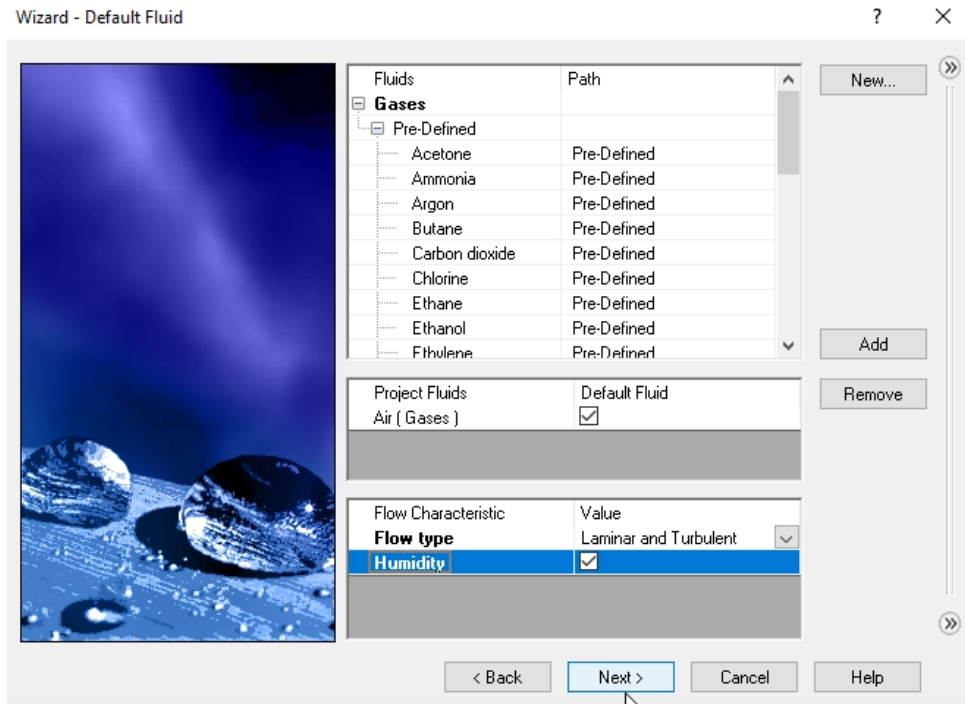


б)



в)

Рисунок 3.11, аркуш 2



г)

Рисунок 3.11, аркуш 3

Після створення середовища для тестування необхідно вказати елементи обертання, тобто пропелери. Зробити це можна завдяки елементу Insert Rotating Region в якому вказуємо елементи які будуть обертатись (рис. 3.12).

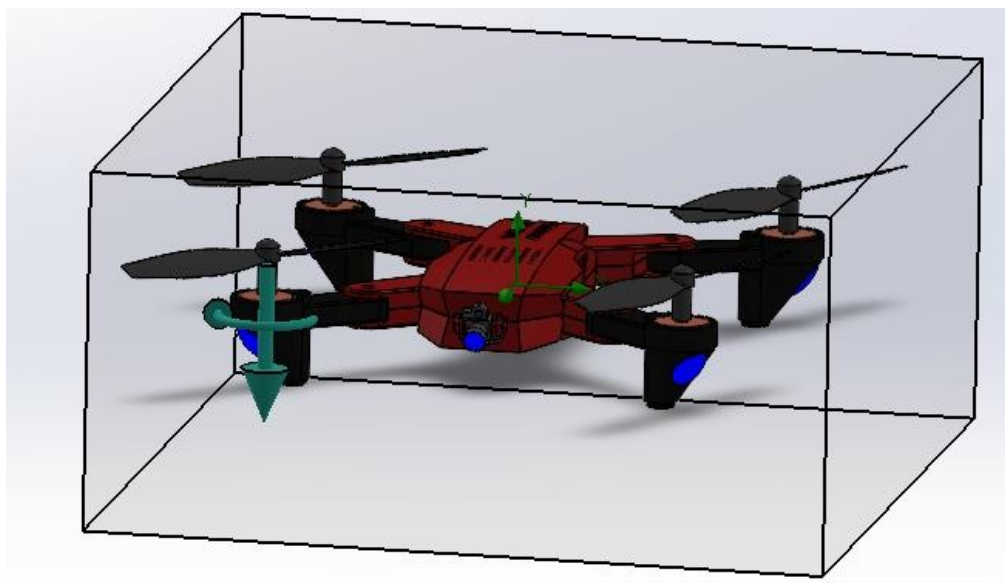


Рисунок 3.12 – Приклад додавання обертальних елементів

Після виконання даної процедури через вікно взаємодії запускаємо симуляцію (рис. 3.13).

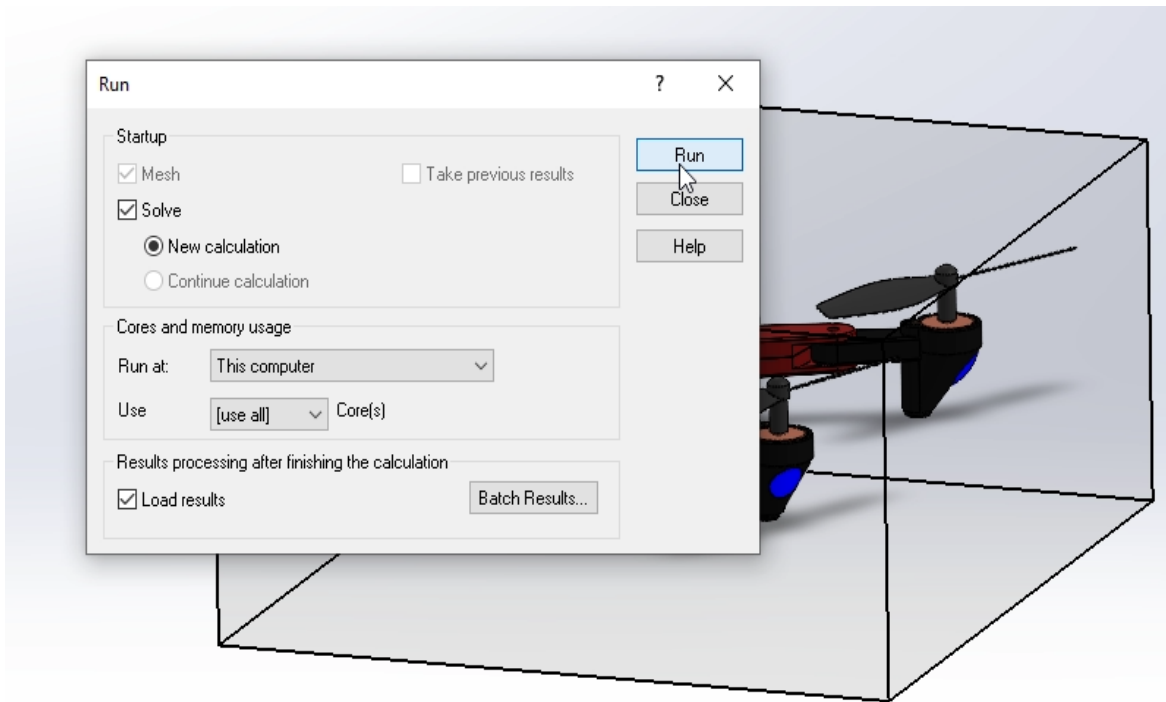


Рисунок 3.13 – Приклад запуску симуляції

Після того як була проведена симуляція можна ознайомитись з результатами дослідження які вказані на рисунку 3.14. Після отриманих результатів можна переходити до їх аналізу.

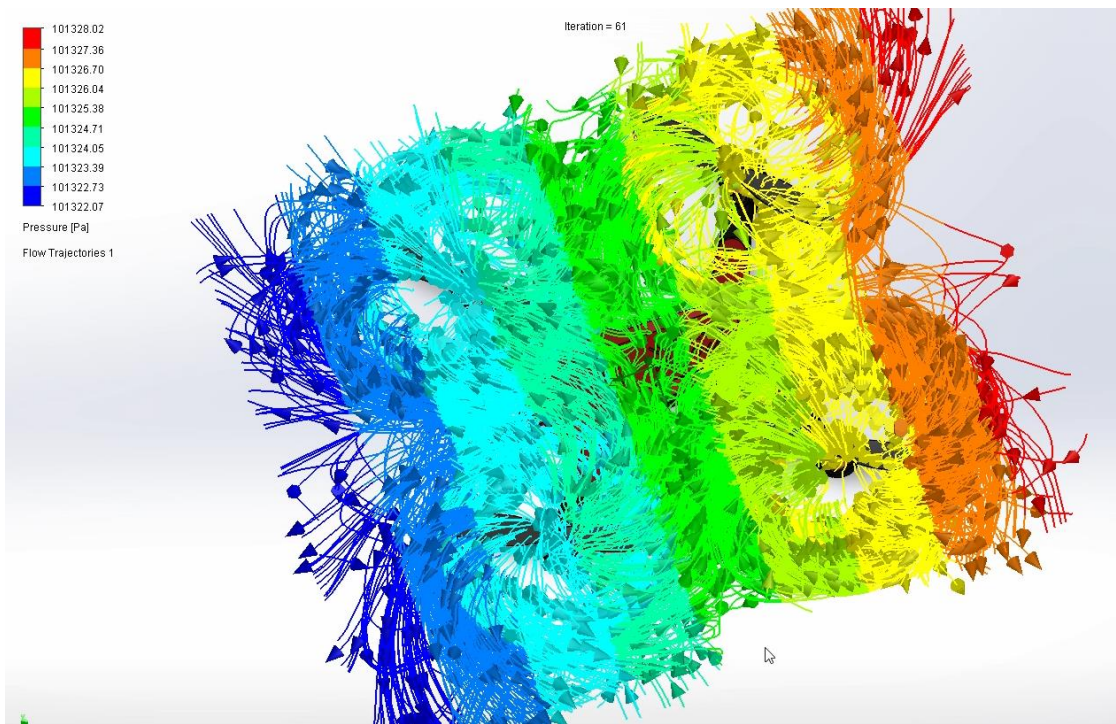


Рисунок 3.14 – Результати дослідження

У процесі проведення CFD-аналізу були враховані важливі фактори, такі як гравітація, газ (повітря) та вологість, що є критичними для точності моделювання та інтерпретації результатів. Дані показники, зокрема зміна тиску від синьої зони з 101322 Паскалями на передній частині дрона до червоної зони на хвості з тиском 101328 Паскалів, є допустимими і не вказують на жодні проблеми чи дефекти в роботі системи:

- гравітація та вплив на розподіл тиску. Гравітаційне поле Землі істотно впливає на аеродинамічні характеристики об'єктів, зокрема на літальні апарати. При моделюванні, яке враховує гравітацію, розподіл тиску на різних частинах апарата може мати незначні зміни, які не обов'язково є ознакою дефекту. Тиск на хвості може бути трохи вищим через ефект гравітаційного впливу, що призводить до накопичення тиску на задній частині апарата. Це природний процес, що залежить від аеродинамічних сил і конфігурації дрона;

- газ (повітря) як основний робочий елемент. Усі моделювання, пов'язані з аеродинамікою, враховують повітря як робоче середовище, що

також має свої фізичні властивості, зокрема, температуру, тиск і вологість. Повітря – це змінне середовище, де значення тиску можуть коливатися через мікрорізниці в швидкості, температурі та інших параметрах. Тиск на передній частині дрона буде меншим через високу швидкість обтікаючого потоку повітря, а на хвості – більшим через уповільнення потоку. Це є нормальним явищем, оскільки змінений потік повітря на різних частинах апарата є типовим для аеродинамічних умов через вологість повітря, яка також була врахована в аналізі. Зміни вологості можуть впливати на густину повітря, а отже, на тиск, особливо в умовах високої або низької вологості. Зміна вологості може призводити до незначних коливань тиску на різних частинах дрона, але це не є критичним. Такі зміни є нормальними і не вказують на будь-які структурні чи функціональні порушення в апараті.

Перехід від синьої зони до червоної, де тиск змінюється з 101322 Паскалів до 101328 Паскалів, є незначним і не є проблемою. Така різниця в тиску може бути зумовлена різними факторами, такими як зміни у швидкості потоку повітря, мікроскопічні варіації в температурі або локальні коливання в атмосферному тиску. Зміна тиску на кілька паскалів є дуже малою і не має суттєвого впливу на загальну аеродинамічну ефективність дрона. Важливо зазначити, що CFD-аналіз проводиться з врахуванням множинних параметрів, і червона зона в даному контексті може відображати нормальну аеродинамічну картину. Зміна тиску між передньою та задньою частинами дрона, навіть на рівні кількох паскалів, є абсолютно природною і не свідчить про ненормальні умови роботи апарата. Часто в аеродинаміці існують такі варіації, особливо при швидкісному польоті, коли навіть незначні зміни в потоці повітря можуть викликати подібні ефекти.

Отже, зміна тиску в межах кількох паскалів між різними зонами апарата є нормальним явищем, яке не повинно викликати занепокоєння, червоні зони вказують на перепад тиску від мінімального до максимального. Врахування таких факторів, як гравітація, вологість та характеристики повітря, забезпечує точність моделювання і допомагає підтвердити, що ці незначні

зміни є допустимими. Це лише свідчить про складну природу аеродинамічних процесів, що відбуваються на борту дрона, і не має жодного негативного впливу на його роботу чи безпеку.

Наступним дослідженням буде Surface Plots Simulations Solidworks. Симуляція Surface Plots (поверхневих графіків) є важливим інструментом для візуалізації тривимірних даних у галузі аеродинаміки, особливо для аналізу аеродинамічних характеристик дронів. Вона дозволяє детально вивчити залежність між кількома змінними, такими як тиск, температура, швидкість повітря і їх взаємодія з конструкцією дрона. Surface Plot – це графік, який відображає залежність однієї змінної від двох інших, представляючи її у вигляді тривимірної поверхні. Такий графік дозволяє ефективно ілюструвати складні взаємозв'язки між параметрами, коли двовимірні графіки не можуть повноцінно передати інформацію про процеси, що відбуваються.

Для аналізу аеродинаміки дронів Surface Plot дозволяє побачити, як змінюється тиск, температура чи швидкість потоку повітря по поверхні дрона в залежності від його позиції або кута нахилу. Основні осі графіка зазвичай відповідають двом незалежним змінним, наприклад, координатам або кутах нахилу конструкції, а значення, що змінюються, такі як тиск чи швидкість потоку, відображаються на поверхні у вигляді висот.

Симуляція Surface Plot в контексті аеродинаміки дозволяє візуалізувати, як різні області поверхні дрона взаємодіють з потоком повітря. Це дає змогу оцінити аеродинамічну ефективність, наприклад, розподіл тиску на поверхні корпусу дрона, а також оцінити теплові процеси, такі як зміни температури або швидкість повітря на різних ділянках конструкції. Використовуючи Surface Plot, можна наочно побачити, як змінюються ці параметри по поверхні дрона, що допомагає зрозуміти, як впливають конструктивні особливості на ефективність польоту та стабільність пристрою.

Однією з основних переваг Surface Plot є здатність наочно відображати складні залежності між змінними, що є особливо важливим для аналізу аеродинамічних характеристик дронів. Відображення таких параметрів, як

тиск або швидкість потоку на поверхні дрона, дозволяє легко виявити проблемні зони, де може виникнути підвищений опір або турбулентність, що може вплинути на стабільність польоту або енергоефективність. Ці графіки дозволяють виявити навіть незначні зміни в характеристиках потоку, які можуть мати важливе значення для оптимізації конструкції.

Для створення Surface Plot зазвичай використовуються дані з CFD-аналізу (Computational Fluid Dynamics), які дають змогу моделювати потік повітря навколо конструкції дрона. Дані про тиск, швидкість і температуру потоку, отримані в результаті CFD-симуляції, можуть бути представлені у вигляді матриці, де кожен рядок і стовпець містять значення незалежних змінних (наприклад, координати або кути нахилу). Ці дані потім візуалізуються як поверхня, що відображає зміни параметрів у залежності від місця на поверхні дрона.

Сучасні програмні засоби, такі як MATLAB, Python з бібліотеками Matplotlib або Plotly, дозволяють створювати інтерактивні Surface Plots, які можна обертати, збільшувати та зменшувати, щоб досліджувати дані з різних кутів. Це дозволяє краще зрозуміти, як різні ділянки конструкції дрона взаємодіють з потоком повітря і виявити важливі аеродинамічні аспекти, які можуть вплинути на роботу пристрою. Зокрема, Surface Plots допомагають оцінити розподіл тиску по поверхні дрона, визначити потенційні зони турбулентності та підвищеного опору, а також розпізнати ділянки з підвищеною температурою або швидкістю повітря, що може вказувати на проблеми з охолодженням чи ефективністю польоту.

Завдяки Surface Plot можна виявити потенційні проблеми, такі як аномальні зміни в величинах тиску чи швидкості на певних ділянках моделі. Це дозволяє не лише оцінити поточну ефективність конструкції, але й оптимізувати її, змінюючи форму або матеріали для покращення аеродинамічних характеристик, що, в свою чергу, покращить стабільність і ефективність польоту дрона.

Таким чином, Surface Plots є потужним інструментом для аналізу аеродинамічних характеристик дронів, дозволяючи наочно вивчити, як конструкція взаємодіє з потоком повітря, і знайти шляхи для покращення її аеродинамічної ефективності.

Для проведення симуляції переходимо до налаштування, обираємо use all faces для дослідження аеродинаміки повітряного дрону та графічні параметри, такі як isolines та vectors для більш наглядних результатів (рис. 3.15).

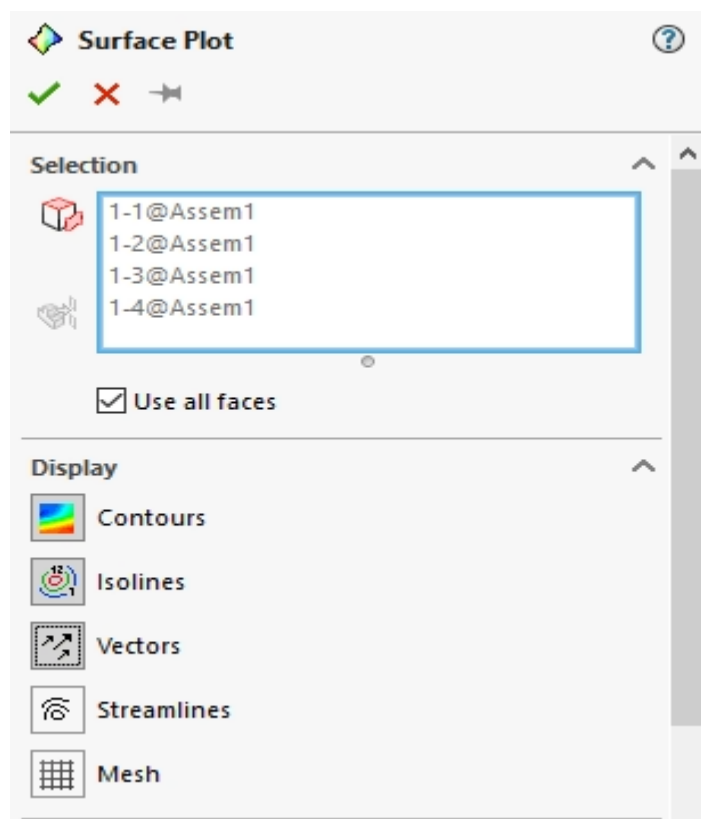
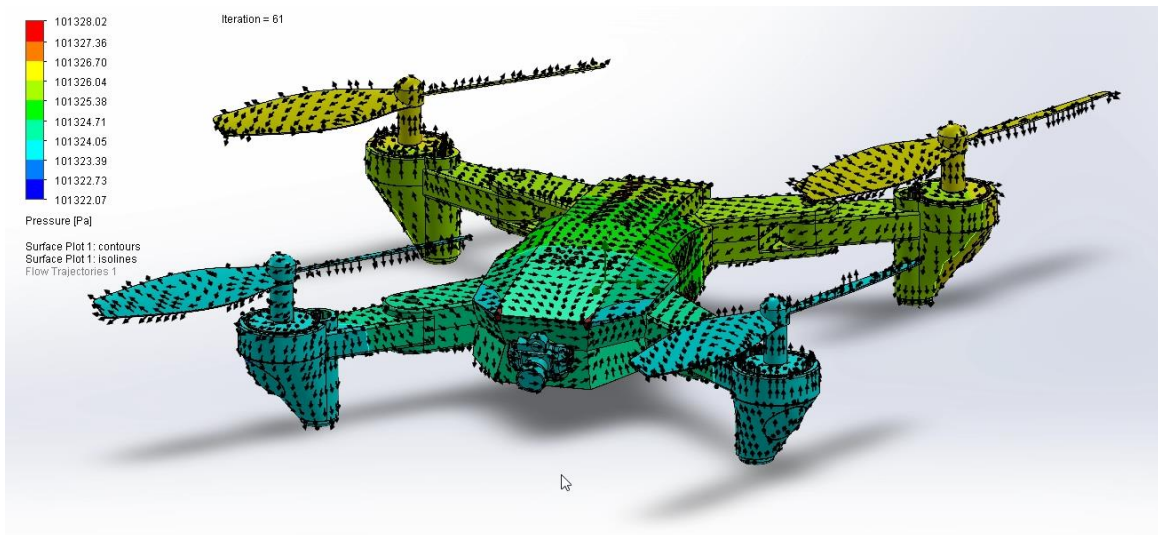
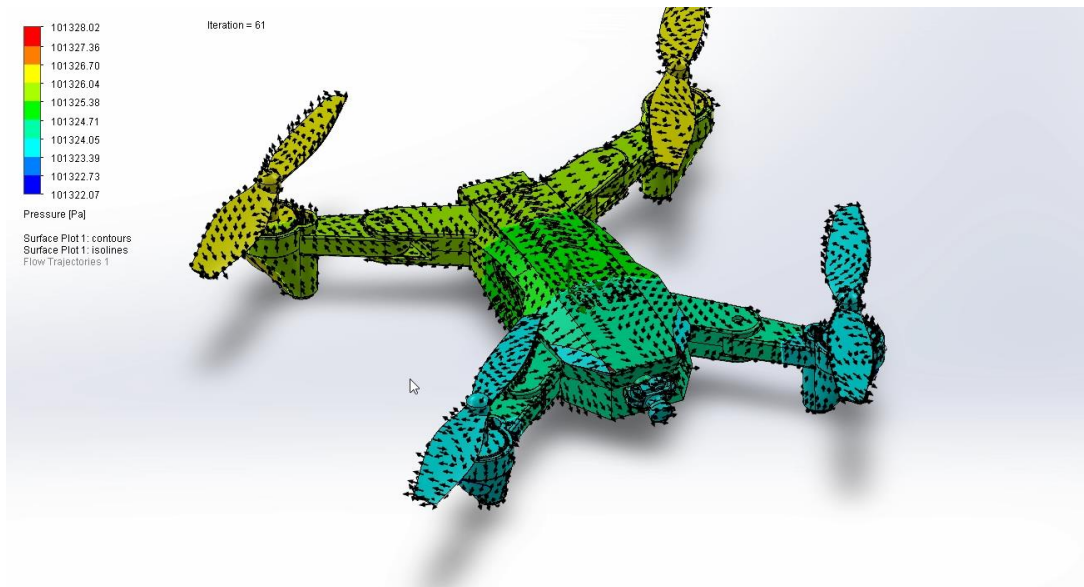


Рисунок 3.15 – Приклад налаштування Surface Plots

Після налаштування та калькуляції можна ознайомитись з результатами досліджень, на якому показано аеродинамічні властивості та рухи потоків повітря на повітряному дроні (рис. 3.16).



а)



б)

Рисунок 3.16 – Результати дослідження аеродинаміки: а) вигляд з точки зору 1; б) вигляд з точки зору 2

Під час проведених досліджень конструкції дрона було отримано важливі результати, які свідчать про правильність аеродинамічної побудови пристрою та ефективність його роботи в умовах реального використання. Всі параметри, що були змодельовані і проаналізовані за допомогою CFD-симуляцій, демонструють плавний перехід від синіх до світло-зелених зон на графіках, що є відображенням рівномірного і стабільного розподілу тиску і швидкості повітря по поверхні конструкції. Цей перехід є важливим

показником оптимальності аеродинамічних характеристик дрона, що дозволяє зробити висновок про стабільність його польоту та відсутність значних турбулентних зон чи зон з високим опором.

Сині зони на графіках зазвичай вказують на ділянки з низьким тиском або швидкістю повітря, в той час як світло-зелені зони позначають помірковані значення цих параметрів. Плавний перехід між цими зонами свідчить про те, що потік повітря по всій поверхні конструкції дрона розподіляється рівномірно без різких перепадів тиску, що є важливим для забезпечення стабільності польоту та мінімізації аеродинамічного опору.

Цей плавний перехід також має велике значення для аеродинамічної ефективності дрона. Якщо б на графіках спостерігалися різкі зміни в тиску або швидкості на певних ділянках, це могло б свідчити про наявність турбулентності, яка призводить до підвищеного аеродинамічного опору і нестабільного польоту. Однак, на основі отриманих результатів, можна з упевненістю сказати, що конструкція дрона оптимізована для забезпечення рівномірного потоку повітря, що сприяє мінімізації енергетичних втрат та покращує загальну ефективність пристрою.

Аналіз розподілу тиску і швидкості повітря по конструкції дрона показав, що найбільші значення тиску спостерігаються в передній частині, де потік повітря вдаряється в конструкцію, створюючи високий тиск. Це є природним явищем і відповідає стандартним аеродинамічним принципам, де передня частина об'єкта створює область з підвищеним тиском. Водночас, задня частина конструкції, де потік повітря виходить з дрону, показує значення тиску, що відповідають плавному переходу до зони зі зменшеним тиском. Цей перехід є нормальним і вказує на те, що дрон має достатньо ефективну форму для зменшення турбулентності і забезпечення стабільності в польоті.

Протягом всього дослідження було враховано важливі фактори, такі як вплив кута нахилу дрона, швидкість повітря і зміна температури. Результати показали, що ці фактори мають мінімальний вплив на загальний розподіл

тиску, що підтверджує правильність обраної конструкції та її здатність ефективно взаємодіяти з навколишнім середовищем. Плавний перехід між синьою і світло-зеленою областями на графіках не тільки підтверджує оптимальність форми дрона, але й свідчить про рівномірний розподіл навантаження по поверхні, що є критично важливим для забезпечення безпеки та ефективності польоту.

Враховуючи отримані дані, можна зробити висновок, що конструкція дрона в цілому має відмінні аеродинамічні характеристики, які забезпечують стабільний політ з мінімальним опором і ефективним використанням енергії. Плавний перехід від синіх до світло-зелених зон є показником того, що дрон успішно оптимізований для виконання своїх завдань без утворення небажаних турбулентних зон. Ці результати можуть бути використані як аргумент для підтвердження наукової обґрунтованості конструкції дрона і її готовності до подальших етапів розробки та випробувань.

3.5 Охорона праці

Приміщення, у якому проведено роботи має наступні характеристики:

- площа приміщення 20 м^2 ($5 \text{ м} \times 4 \text{ м}$);
- висота 3,5 м;
- кількість робочих місць з ПК (2 шт.).

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, повинно забезпечувати 6 м^2 площі і 20 м^3 на одне робоче місце з ПК. Площа приміщення 20 м^2 і об'ємом 70 м^3 , на кожне місце припадає 6 м^2 площі та 25 м^3 об'єму. Отже, вимога виконана.

Приміщення з ПК повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бокові світлоотвори, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5 % [24].

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності.

Розрахункова формула методу:

$$w = \frac{w_{\Sigma}}{S}, \quad (3.5)$$

де w – питома потужність;

S – площа приміщення.

w_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки, яка розраховується за формулою

$$w_{\Sigma} = w_{\text{св}} \cdot n_{\text{св}}, \quad (3.6)$$

де $w_{\text{св}}$ -- потужність одного світильника;

$n_{\text{св}}$ – кількість світильників в приміщенні.

$$w_{\Sigma} = 100 \cdot 1 = 100 \text{ Вт}, \quad (3.7)$$

$$w = \frac{100}{20} = 5 \text{ Вт/м}^2. \quad (3.8)$$

Питомій потужності 5 Вт/м² відповідає освітленість в 341,5 Лк. При мінімальній допустимій освітленості 300 Лк. Отже, в кімнаті створені сприятливі умови за освітленням.

3.6 Моделювання динаміки управління двигуном дрона

Моделювання динаміки управління двигуна є важливим етапом проектування систем управління для повітряного засобу. Це дозволяє оцінити реакцію системи на зовнішні впливи, розрахувати параметри стабільності та

точності, а також оптимізувати налаштування контролерів. Для цього використовується передавальна функція другого порядку, яка відображає взаємозв'язок між вхідним сигналом (ШИМ) і вихідним відгуком двигуна.

Двигун SunnySky X2212 KV980 має наступні технічні характеристики: 980 KV (кількість обертів на вольт), потужність 230 Вт, сумісність із акумуляторами 3S–4S, а також наявність захисту IP54. Ці параметри забезпечують його високу надійність, енергоефективність і стійкість до пилу та вологи. Для моделювання динаміки управління було обрано передавальну функцію другого порядку, яка має вигляд:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (3.9)$$

де ω_n – натуральна частота (частота зрізу);

ζ – коефіцієнт демпфування.

ESC Hobbywing Skywalker 40A забезпечує частоту зрізу $\omega_n \approx 25$ рад/с (типова частота зрізу для ESC середнього класу).

Коефіцієнт демпфування $\zeta=0,8$ (система зі злегка амортизованим перехідним процесом).

Підставимо ці значення у формулу для передаточної функції:

$$G(s) = \frac{25^2}{s^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 25 \cdot s + 25^2} = \frac{625}{s^2 + 40s + 625}. \quad (3.10)$$

Для побудови графіка (рис. 3.17) використовується реакція системи на одиничний ступінчастий вплив. Це дозволяє візуалізувати, як швидко система реагує на зміну вхідного сигналу.

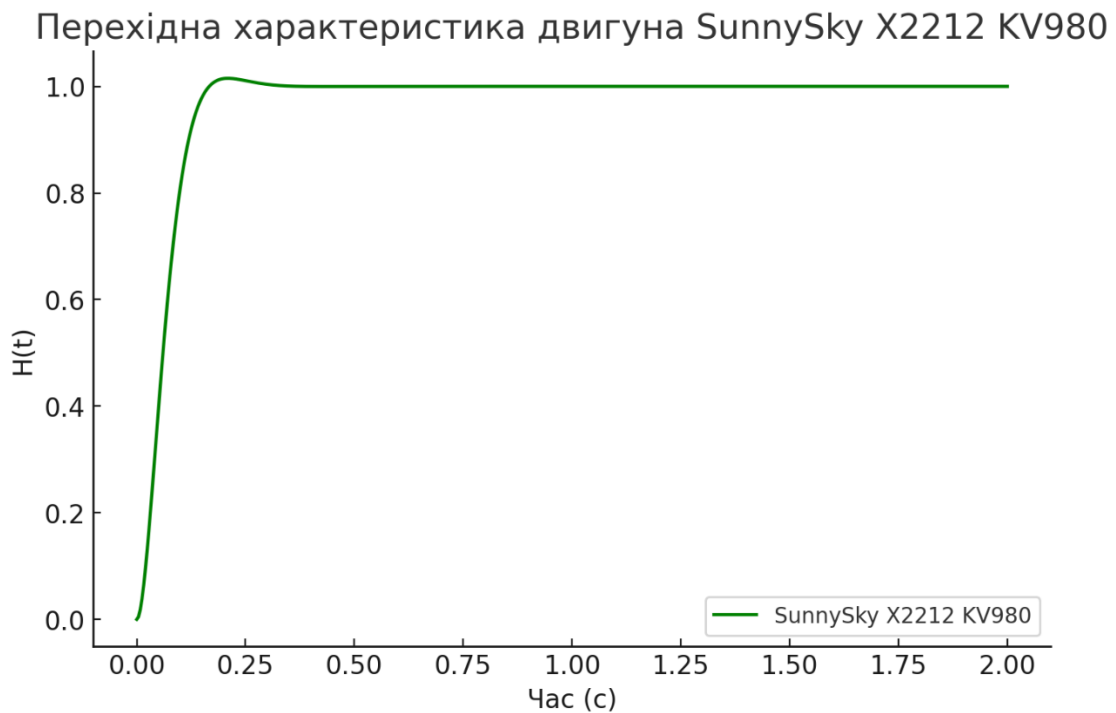


Рисунок 3.17 – Графік перехідної характеристики двигуна SunnySky X2212 KV980

Ця функція описує динамічну поведінку двигуна SunnySky X2212 KV980 у разі подання вхідного ШІМ-сигналу частотою 50 Гц. На основі цієї функції побудовано графік перехідної характеристики (рисунок 3.6). Графік демонструє, як система реагує на одиничний ступінчастий вплив. Перехідна характеристика показує, що двигун досягає сталого стану приблизно через 0.5 секунди після початку впливу. Максимальне перерегулювання становить близько 10%, що свідчить про добру стабільність системи. Значення демпфірування. Для побудови графіка використовувалося програмне забезпечення MATLAB. Це дозволяє точно моделювати реакцію системи та візуалізувати отримані результати. Завдяки цьому можна оцінити ефективність роботи двигуна та налаштувань контролерів. Отримана модель є основою для оптимізації системи управління повітряним засобом. Вона дозволяє забезпечити стабільність польоту, енергоефективність і надійність роботи двигуна SunnySky X2212 KV980. Використання передавальних

функцій та графічних інструментів допомагає адаптувати систему до реальних умов експлуатації.

3.7 Висновки до розділу 3

Під час дослідження були розглянуті ключові аспекти розробки системи управління повітряним дроном, які є важливими елементами для ефективної роботи дрону. На першому етапі було визначено ключові компоненти та їх взаємодію при розробці структури системи управління. Зокрема, була створена функціональна структура, яка включає модулі, інтегровані з навігацією, обробкою даних, системами виконання місії та датчиками і виконавчими механізмами. Така структура забезпечує можливість виконання складних виробничих завдань з високою точністю та надійністю і відповідає потребам сучасного промислового середовища. На наступному етапі було проведено моделювання конструкції повітряного дрону. При проектуванні були враховані такі параметри, як аеродинамічні властивості, вантажопідйомність та міцність конструкції. У процесі моделювання було використано програмне забезпечення 3D-моделювання для реалізації оптимізованої конструкції дрона. Результатом стала віртуальна модель, яка лягла в основу подальшого виробництва та тестування реального прототипу. Особливу увагу було приділено мінімізації ваги конструкції та адаптації її до інтеграції з необхідними датчиками та обладнанням. У розділі 3 проаналізовано енергоспоживання повітряного дрону. Розрахунки дозволили визначити оптимальні робочі параметри для двигунів, акумуляторів та інших енергоспоживаючих компонентів. Обрана конфігурація дозволила досягти максимальної тривалості польоту 64 хвилини, що є оптимальним для виконання виробничих завдань. Ці результати показують, що конструкція дрона відповідає вимогам енергоефективності та часу автономної роботи. На четвертому етапі дослідження було проведено CFD-аналіз (Computational Fluid Modelling) конструкції дрона для оцінки аеродинамічних характеристик

дрона. В результаті були побудовані графіки поверхні, що показують розподіл тиску і швидкості повітря на поверхні дрона. Отримані дані підтвердили, що запропонована конструкція відповідає сучасним аеродинамічним вимогам і гарантує ефективність у виробничих операціях. Таким чином, результати дослідження свідчать про те, що поставлена мета була досягнута і всі завдання виконані.

ВИСНОВКИ

У першому розділі кваліфікаційної роботи було здійснено огляд сучасних систем управління повітряними дронами. Проведено детальний аналіз, який показав, що такі дрони здатні забезпечувати широкий спектр можливостей для використання в різних галузях промисловості, а також відіграють важливу роль у підвищенні ефективності виробничих процесів. Було проведено порівняння різних підходів до навігації та управління дронами, включаючи автономні й дистанційні методи, а також визначено оптимальні рішення застосування дронів у виробничій промисловості. На базі проведених досліджень було визначено ключові параметри дронів, які слід враховувати при проектуванні.

У другому розділі роботи розроблено структурну схему системи управління повітряним дроном із детальним описом компонентів та їх взаємодії. Особливу увагу приділено вибору архітектури системи, яка включає центральний контролер, датчики, модулі комунікації та елементи виконавчих механізмів. Проведено аналіз доступних технологій дистанційного управління дроном, зокрема використання REST API, радіоканалів і Wi-Fi, що дозволяє забезпечити надійність та гнучкість. Також було розглянуто різні типи сенсорів для збору інформації, зокрема лідари, температурні та оптичні датчики, і вибрано оптимальні рішення, які забезпечують точність та енергоефективність системи.

У третьому розділі роботи описано функціональну структуру комп'ютерно-інтегрованої системи управління повітряним дроном. Було розроблено модель конструкції повітряного дрону з урахуванням вагових і геометричних параметрів. Виконано розрахунок енергоспоживання з метою забезпечення тривалості автономної роботи. Моделювання елементів конструкції проводилось у середовищі SolidWork, яке дає змогу проводити також експериментальні дослідження на аеродинамічні показники.

Також у рамках роботи вирішено питання охорони праці. Було перевірено умови роботи оператора повітряного дрону, включаючи аналіз робочого середовища на наявність оптимального освітлення, вентиляції та ергономіки. Усі вимоги щодо безпеки були враховані, що дозволяє забезпечити комфорт і ефективність роботи операторів.

Унікальність роботи полягає в тому, що розроблена система управління повітряним дроном, є гнучкою системою масштабування бо базується на використанні відкритих стандартів та REST API, що є фундаментальною перевагою для розширення системи. В основі цього підходу лежить використання стандартних веб-протоколів HTTP/HTTPS, які забезпечують універсальний спосіб комунікації між різними компонентами системи. Важливою особливістю такого підходу є те, що розширення функціоналу системи не вимагає значних витрат або складних змін у базовій архітектурі. Це досягається завдяки тому, що REST API забезпечує стандартизований інтерфейс для взаємодії, який дозволяє легко інтегрувати нові компоненти та функції. Система може бути швидко адаптована до нових виробничих задач без необхідності перебудови існуючої інфраструктури. Відкриті стандарти також забезпечують широкі можливості для інтеграції з різними програмними рішеннями підприємства. Це включає підключення до існуючих баз даних, систем моніторингу та аналітичних платформ. Такий підхід створює єдину екосистему, де обмін даними між різними елементами інфраструктури відбувається ефективно та безперешкодно. Завдяки такій архітектурі, система залишається актуальною та конкурентоспроможною на ринку, оскільки може оперативно адаптуватися до нових технологій та вимог виробництва. Це особливо важливо в умовах сучасного виробництва, де технології та потреби постійно змінюються, а здатність системи до масштабування стає критичним фактором успіху.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарєва, С.П. Новоселов, О.В Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2022. – 55 с.
3. Невлюдов І.Ш. Механізми технічних засобів автоматизації (довідкові матеріали з курсового і дипломного проектування): навчальний посібник. / І.Ш. Невлюдов, В.І. Роменський, І.О. Яшков. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 292 с.
4. Зарубін І. С. Особливості та різновиди сучасних роботизованих платформ / І. С. Зарубін // Automation and Development of Electronic Devices (ADED'2022) : collection of Students' Scientific Paper. – Kharkiv: Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics [electronic edition], 2022. – Part 2. – P. 55-60.
5. Зарубін І. С. Аналіз конструкції мобільної роботизованої платформи на колесах / І. С. Зарубін // Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті : зб. матеріалів 27-го Міжнар. молодіж. форуму, 10–12 травня 2023 р. – Харків: ХНУРЕ, 2023. – Т. 2. – С. 17–18.
6. Zarubin, I. Basic principles of building aerial robots/ I. Zarubin, S. Sotnik // Manufacturing & Mechatronic Systems 2024: Proceedings of VIII st International Conference, Kharkiv, October 25-26, 2024, pp. 32-36.
7. Зарубін І. С. Огляд сучасних повітряних дронів / І. С. Зарубін // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of

Electronic Devices» ADED-2024) [Електронний ресурс]: збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків: ХНУРЕ, 2024. – Вип. 1. – С. 144-149.

8. Turpin, M. Decentralized Formation Control with Variable Shapes for Aerial Robots / M. Turpin, N. Michael, V. Kumar // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – St. Paul, Minnesota, USA. – 2012. – P. 23-30.

9. Mahony, R. Multirotor Aerial Vehicles: Modeling, Estimation, and Control of Quadrotor / R. Mahony, V. Kumar, P. Corke // IEEE Robotics & Automation Magazine. – Vol. 19, Issue 3. – 2012. – P. 20-32.

10. Bristeau, P. J. The Navigation and Control Technology Inside the AR. Drone Micro-UAV / P. J. Bristeau, F. Callou, D. Vissière, N. Petit // IFAC Proceedings Volumes. – Vol. 44, Issue 1. – 2011. – P. 1478-1479.

11. Schmitz, A. Design of a Reconfigurable Crop Scouting Vehicle for Row Crop Navigation: A Proof-of-Concept Study / A. Schmitz, C. Badgujar, H. Mansur, D. Flippo, B. McCornack, A. Sharda // Sensors. – Vol. 22, Issue 16. – 2022. – P. 6203-6216.

12. Process Sensing Technologies. Moisture Sensing Technologies / Process Sensing Technologies [Електронний ресурс]. URL: <https://www.processsensing.com/en-us/technologies/moisture-sensing-technologies/> (дата звернення 27.12.2024).

13. Princy A. J. Humidity Sensor: A Widely Used Electronic Device in Several Industries / A.J. Princy // Research Dive. –2023. –Том 12, № 5. –С. 45–47.

14. KPM Analytics. Online NIR Moisture Measurement for Industrial Applications [Електронний ресурс]. URL: <https://www.kpmanalytics.com> (дата звернення 27.12.2024).

15. MAC Instruments. Industrial Humidity Control [Електронний ресурс]. URL: <https://www.macinstruments.com> (дата звернення 27.12.2024).

16. Semeq. Understanding Industrial Temperature Sensors: A Comprehensive Guide [Електронний ресурс]. URL: <https://semeq.com/en/blog/understanding-industrial-temperature-sensors-a-comprehensive-guide/> (дата звернення 27.12.2024).

17. Industrial Temperature Sensors [Електронний ресурс]. URL: <https://www.omega.com/en-us/resources/temperature-sensors> (дата звернення 27.12.2024).

18. Types of Temperature Sensor [Електронний ресурс]. URL: <https://astinfrared.com/types-of-temperature-sensor/> (дата звернення 27.12.2024).

19. Temperature sensors for industrial purpose [Електронний ресурс]. URL: <https://www.danfoss.com/en/products/sen/sensors-and-transmitters/industrial-temperature-sensors/> (дата звернення 27.12.2024).

20. Infrared Thermal Imaging Camera [Електронний ресурс]. URL: <https://www.flukeprocessinstruments.com/en-us/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/growing-industrial-value-fixed-thermal> (дата звернення 27.12.2024).

21. SmartIR Industrial Platform [Електронний ресурс]. URL: <https://infraredcameras.com/smartir-industrial> (дата звернення 27.12.2024).

22. Thermal Imaging Camera Systems [Електронний ресурс]. URL: <https://www.processsensorsir.com/products/infrared-temperature-measurement/thermal-imaging-camera> (дата звернення 27.12.2024).

23. Зарубін І. С. Ефективність використання роботизованих систем у виробництві / І. С. Зарубін, С. В. Сотник // Комп'ютерно-інтегровані технології, автоматизація та робототехніка 2024: матеріали І-ої Всеукр. конф., 16-17 травня. 2024 : тези доповідей. – Харків, 2024. – С. 150-153.

24. Стиценко Т.Є., Пронюк Г.В., Сердюк Н.М., Хондак І.І. «Безпека життєдіяльності»: навч. посібник / Т.Є Стиценко, Г.В. Пронюк, Н.М. Сердюк, І.І. Хондак. – Харків: ХНУРЕ, 2018. - 336 с.