

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Факультет комп'ютерних наук

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

т. в. о завідувача кафедри АКІТ
кандидат технічних наук, доцент

_____ М. І. Сіделєв

« ___ » _____ 2024 р

МАГІСТЕРСЬКА НАУКОВА РОБОТА

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ПОВІТРЯНИХ ДРОНІВ

ПОБУТОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Спеціальність «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

151 – МНР – 671. 22037101

Студент

_____ Г.Ю. Терещенко

« ___ » _____ 2024 р.

Керівник доктор техн. наук, професор

_____ О.М. Трунов

« ___ » _____ 2024 р.

Миколаїв – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Чорноморський національний університет ім. Петра Могили

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення: Комп'ютерних наук
Кафедра, циклова комісія: Автоматизація та КІТ
Освітньо-кваліфікаційний рівень: рівень вищої освіти другий (магістр)
Напрямок підготовки 151 «Автоматизація та приладобудування»

(шифр і назва)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри, голова циклової комісії

Сіделєв М. І. _____

“ ____ ” _____ 2023 р

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ НАУКОВУ РОБОТУ

Видано студенту групи 671м факультету комп'ютерних наук

Терещенку Геннадію Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи): Автоматизовані системи повітряних дронів побутового призначення

Керівник проекту (роботи) : Доктор техн. наук, професор Трунов Олександр Миколайович,

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ ____ ” _____ 2023 р. № ____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 17.06. 2024

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

Висота будинків 75-100 м, відстань між будинками 50- 70 м. Наявність бездротових мереж. Очікуваним результатом роботи є модель, що дозволяє проводити імітаційне моделювання роботи БПЛА у складі АСК, що застосовують безлюдні технології побуту для віддаленого керування їх роботою для виконання

побутових потреб споживачів. Вхідними даними роботи є архітектура мереж, що забезпечує роботу безпілотних авто з електричним приводом та автономних роботів для виконання вантажно-розвантажувальних і переносних робіт.

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): - огляд сучасних підходів та прикладів до застосування БПЛА та автоматизованих систем, що побудовані на їх основі, визначення стану і тенденцій подальшого розвитку;

- обґрунтування вибору моделей, методів, аналітичного забезпечення та середовища розв'язку задач застосування БПЛА у побуті;

- розробка системи аналітичної оцінки та порівняння ефективності роботи БПЛА і інших складових як окремих технологічних операцій і технологічний процес у цілому;

- розробка моделі опису руху БПЛА як елементу системи безлюдних технологій та для імітаційного моделювання динаміки елементів системи та синтез керування застосуванням структурних елементів на різних етапах.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Блок-схеми систем, рисунки загальних видів елементів конструкцій, схематичні зображення, екранні відображення фрагментів ПЗ (скріншоти). Презентація

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Трунов О. М., д. т. н. професор каф. АКІТ	12.10.2023	
2	Трунов О. М., д. т. н. професор каф. АКІТ	03.01.2024	
3	Трунов О. М., д. т. н. професор каф. АКІТ	03.04.2024	
4	Григор'єва Л. І., доктор. біол. наук, проф. кафедри екології	19.04. 2024	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Затвердження пропозицій теми від керівника	20.09.2023	
2	Обговорення із студентом затвердженої теми	02.10.2023	
3	Формування завдання	12.10.2023	
4	Визначення актуальності, об'єкту, предмету	01.11.2023	
5	Пошук літератури, патентний пошук, уточнення задач дослідження	15.11.2023	
6	Виконання першої частини	01.12.2023	
7	Аналіз керівником записки першої частини (ЕВ*), формування зауважень та пропозицій	29.12.2023	
8	Передзахист першої частини	26.01.2024	
9	Опрацювання другої частини	01.03.2024	
10	Робота над третьою частиною	05.04. 2024	
11	Робота над розділом з охорони праці	20.05. 2024	
12	Передзахист	03.06. 2024	
13	Передача (ДВ) кваліфікаційної роботи	17.06. 2024	

*ЕВ – електронний варіант, ДВ – друкований варіант.

Студент 671 гр. Терещенко Г. Ю.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) Трунов О. М.

(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

До магістерської наукової роботи

«Автоматизовані системи повітряних дронів побутового призначення»

Студента 671 групи Терещенка Геннадія Юрійовича

Керівник: доктор технічних наук, професор кафедри АКІТ Трунов О.М.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи обумовлена необхідністю зменшення долі людської участі і трудовитрат у загальному обсязі трудомісткості робіт та підвищення ефективності за рахунок впровадження автоматизації у сфері обслуговування та побуту громадян.

Метою роботи є підвищення ефективності застосування повітряних дронів побутового призначення шляхом побудови АСК та розширення переліку послуг введенням додаткових структурних доповнень до працюючих сервісів та послуг, що вже існують на ринку.

Об'єктом дослідження є автоматизація технологічних операцій, що придатні виконувати повітряні безпілотні апарати.

Предметом дослідження є методи, моделі, які дозволять оцінювати і підвищити точність оцінки ефективності технологічних операцій, що придатні виконувати повітряні безпілотні апарати при реалізації побутових задач самостійно та у кооперації із іншими сервісами.

Для досягнення визначеної мети були сформульовані наступні завдання:

1. Виконати аналітичний огляд літератури та патентної інформації за темою роботи.
2. Обґрунтувати архітектуру АСК та розробити функціональну схему АСК ТП із можливостями залучення і застосування власних та існуючих сервісів.
3. Сформувати блок-схему алгоритму управління виконавчими пристроями залежно від рівня структури, характеристик побутового об'єкту

4. Розробити загальну структуру АСК та схеми: функціональну, бортову систему дистанційного керування по РК дроном та процесом через диспетчерську та бездротові мережі і хмарні сервіси.

5. Розглянути питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях.

Кваліфікаційна робота містить перелік скорочень, вступ, чотири розділи, висновок, перелік джерел посилання та два додатки.

Вступ містить основні обґрунтування актуальності розробки обраної теми, об'єкт, предмет дослідження, мету та завдання, які необхідно виконати для досягнення поставленої мети.

У розділі 1 було досліджено стан та тенденції розвитку безпілотних технологій керуємих БПЛА їх технічні реалізації, недоліки та переваги і можливості за даними літературних джерел, паспортів та описів патентів. На підставі аналізу сукупної інформації дискусій, правових протеріч і проблем та інноваційної ідеї поширення застосування до сфери побуту було сформовано погляд на структуру АСК застосування БПЛА у побуті.

У розділі 2 обґрунтовується та розвивається функціональна схема АСК ТП застосування БПЛА у побуті, пропонуються структурні елементи, що забезпечать просування ідеї на ринок на відміну від існуючих пропозицій, що гальмуються правовими протиріччями. Запропоновано комплексне застосування як доповнення до мережі існуючих сервісних центрів доповнень у виді безлюдних технологій авто, БПЛА та робота. Для даного набору дронів на основі алгоритму ефективності побудована модель ефективності. Запропоновано моделі підрахунку її складових, що дозволяє проводити імітаційне моделювання. На підставі відомих емпіричних даних продемонстрований приклад безконфліктної комплексної роботи, що при цьому суттєво знизило витрати. Імітаційне моделювання встановило, що для повного моделювання і підрахунку ефективності необхідно мати модель просторового руху БПЛА. На підставі обраних параметрів було створено 3D модель для дослідження динаміки просторового руху у середовищі Blender.

У третьому розділі представлено систему шести скалярних рівнянь, що описують рух дрона; спрощену модель руху у базовій системі координат, а також застосовано спрощення розв'язку системи, за методом рекурентної апроксимації.

Проведено моделювання, продемонстровано, що послідовності збіжні і дозволяють розраховувати головні кінематичні параметри руху БПЛА, що необхідні для підрахунку ймовірності виконання технологічної операції.

У четвертому розділі розглянуто питання з охорони праці. Проведено опис обраного виробничого приміщення та робочого місця оператора. Проведено розрахунки для інтегральної оцінки умов праці на робочому місці. Підтверджено відповідність нормам рівня шуму на робочому місці. Підтверджено відповідність нормам параметрів мікроклімату, в робочому приміщенні, такі як: температура, вологість повітря, рівень та освітленість. Розроблено рекомендації щодо покращення умов праці на робочому місці з метою забезпечення оптимальних умов праці згідно з чинним законодавством.

У висновку описано результати виконання кваліфікаційної роботи та пропозиції.

Магістерська робота складається з анотації на 4 сторінках, вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання та літератури із 41 найменувань та 2 додатків. Основна частина роботи становить 88 сторінок, серед яких 43 рисунки та 13 таблиць.

Наукова новизна полягає у створенні моделі та алгоритму для підрахунку сумарної ефективності за емпіричними даними для групи типів дронів, що сумісно виконують технологічні операції із застосуванням БПЛА у побуті.

Практична значимість розробленої системи полягає у тому, що вона дозволяє дистанційно керувати структурними елементами та змінюючи виконавців і уходити від правових протеріч із приватною власністю та приватними власниками і правилами регулювання польотів та знижувати вартість виконання робіт.

Апробація результатів кваліфікаційної роботи відбувалась під час XVIII міжнародної наукової конференції «ОЛЬВІЙСЬКИЙ ФОРУМ-2024 (доповідь «Ефективність та удосконалення застосування дронів у АСК побуту»), семінар

кафедри АКІТ ЧНУ ім. Петра Могили червень 2024р (доповідь «Автоматизовані системи повітряних дронів побутового призначення»).

Публікації. Трунов О. М., Поздняков О. В., Терещенко Г.Ю. Ефективність та удосконалення застосування дронів у АСК побуту. Тези ОЛЬВІЙСЬКИЙ ФОРУМ-2024. Миколаїв. 2024.

Ключові слова: автоматизована система, безлюдні технології, спільне застосування, дрон, модель ефективності, БПЛА, просторовий рух, оцінка параметрів.

ABSTRACT

To the master's scientific work

"Automated systems of aerial drones for domestic purposes"

Student 671 of Tereshchenko Gennadiy Yuriyovych group

Supervisor: Doctor of Technical Sciences, professor of AKIT department Trunov O.M.

The relevance of the topic of qualification work is due to the need to reduce the share of human participation and labor costs in the total amount of labor intensive work and increase efficiency due to the introduction of automation in the sphere of service and life of citizens.

The purpose of the work is to increase the efficiency of the use of aerial drones for household purposes by building an ASK and expanding the list of services by introducing additional structural additions to the working services and services that already exist on the market.

The object of research is the automation of technological operations suitable for performing aerial drones.

The subject of research are methods, models that will allow to evaluate and increase the accuracy of the evaluation of the efficiency of technological operations, which are suitable for performing aerial drones in the implementation of household tasks independently and in cooperation with other services.

To achieve the defined goal, the following tasks were formulated:

1. Perform an analytical review of the literature and patent information on the topic of the work.
2. To justify the architecture of the ASK and develop a functional scheme of the ASK TP with the possibility of attracting and using its own and existing services.
3. Create a block diagram of the executive device control algorithm depending on the level of the structure, the characteristics of the household object
4. Develop the general structure of the ACS and schemes: a functional, on-board system for remote control of the RC drone and the process through the control room and wireless networks and cloud services.
5. Consider issues of occupational health and safety in emergency situations.

The thesis contains a list of abbreviations, an introduction, four chapters, a conclusion, a list of reference sources and two appendices.

The introduction contains the main reasons for the relevance of the development of the chosen topic, the object, the subject of research, the goal and the tasks that must be performed to achieve the goal.

In chapter 1, the state and trends in the development of unmanned technologies of controlled UAVs, their technical implementation, shortcomings and advantages and opportunities were investigated according to literary sources, passports and patent descriptions. On the basis of the analysis of the aggregate information of discussions, legal misunderstandings and problems and the innovative idea of spreading the application to the sphere of everyday life, a view was formed on the structure of the UAV application in everyday life.

Chapter 2 substantiates and develops the functional scheme of ASK TP for the use of UAVs in everyday life, structural elements are proposed that will ensure the promotion of the idea to the market, in contrast to existing proposals that are hampered by legal contradictions. A comprehensive application is proposed as an addition to the network of existing service centers, additions in the form of unmanned technologies of cars, UAVs and robots. An efficiency model was built for this set of drones based on the efficiency algorithm. A model for calculating its components is proposed, which allows simulation modeling. On the basis of known empirical data, an example of conflict-free integrated work is demonstrated, which at the same time significantly reduced costs. On the basis of simulation modeling, it was established that for full simulation and calculation of efficiency, it is necessary to have a model of the spatial movement of the UAV. Based on the selected parameters, a 3D model was created to study the dynamics of spatial movement in the Blender habitat.

The third chapter presents a system of six scalar equations describing the drone's motion; a simplified model of movement in the basic coordinate system, and also a simplification of the solution of the system, using the method of recurrent approximation, is applied.

Simulations were carried out, it was demonstrated that the sequences are convergent and will allow to calculate the main kinematic parameters of the UAV movement, which are necessary for calculating the probability of performing a technological operation.

In the fourth chapter, the issue of labor protection is considered. A description of the selected production premises and the operator's workplace has been carried out. Calculations were made for an integral assessment of working conditions at the workplace. Compliance with workplace noise standards has been confirmed. Compliance with the norms of the microclimate parameters in the working room, such as: temperature, air humidity, level and lighting, has been confirmed. Recommendations have been developed to improve working conditions at the workplace in order to ensure optimal working conditions in accordance with current legislation.

The conclusion describes the results of the qualification work and the proposal.

The master's thesis consists of an abstract on 4 pages, an introduction, four chapters, conclusions, a list of reference sources and literature from 41 titles and 2 appendices. The main part of the work is 88 pages, including 43 figures and 13 tables.

The scientific novelty consists in the creation of a model and algorithm for calculating the total efficiency based on empirical data for a group of types of drones that jointly perform technological operations with the use of UAVs in everyday life.

The practical significance of the developed system lies in the fact that it allows remote control of structural elements and by changing executors and avoiding legal conflicts with private property and private owners and flight regulation rules and reducing the cost of work.

Approbation of the results of the qualification work took place during the 15th international scientific conference "OLVIAN FORUM-2024" (report "Effectiveness and improvement of the use of drones in the ASK of everyday life"), a seminar of the AKIT CHNU department named after Petra Mohyly June 2024 (report "Automated systems of aerial drones for domestic use").

Publications. Trunov O. M., Pozdnyakov O. V., Tereshchenko G. Yu. Effectiveness and improvement of the use of drones in household ASK. Theses OLVI FORUM-2024. Mykolaiv. 2024.

Keywords: automated system, unmanned technologies, joint application, drone, efficiency model, UAV, spatial motion, parameter estimation.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ І. СТАН, ТЕНДЕНЦІЇ ТА РОЗВИТОК АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ПОБУТОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ ДРОНІВ.....	8
1.1 Стан та тенденції розвитку безпілотних літальних апаратів, як елементу АСК для безлюдних технологій побуту.....	8
1.2 Структурні особливості та визначні характеристики мультикоптерів	15
1.3 Конструктивні особливості та технічні характеристики парку БПЛА, що придатні для використання у АСК побуту.....	19
1.4 Аналіз патентних рішень, обґрунтованість використання та перспективні конструкції і технології застосування дронів у побуті.	25
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	28
РОЗДІЛ 2 РОЗВИТОК СТРУКТУРИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ АСК ТП ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА.....	29
2.1 Розвиток структури АСК ТП застосування БПЛА у побуті.....	29
2.2 Особливості структури БПЛА як спеціалізованого елементу АСК ТП побутових послуг	33
2.3 Ефективність АСК ТП застосування БПЛА у побуті та потреба просторового моделювання його руху.....	40
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	47
РОЗДІЛ 3 РОЗВИТОК СТРУКТУРИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ АСК ТП ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БПЛА У ПОБУТІ	48
3.1 Постановка задачі про просторовий рух БПЛА	48
3.2 Моделі зовнішніх сил та моменти сил, що діють на БПЛА	55

3.3	Моделі руху у базовій системі координат та їх спрощення.	58
3.4	Особливості формування системи керування побутовим БПЛА	72
	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	77
4	УРАХУВАННЯ ПИТАНЬ ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПОВІТРЯНИХ ДРОНІВ ПОВУТОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	81
4.1	Опис обраного виробничого приміщення, робочих місць, їх обладнання та складання вихідних даних для кількісної оцінки умов праці.....	81
4.1.1	Інтегральна оцінка умов праці в обраному виробничому приміщенні	82
4.1.3	Оцінка ефективності заходів щодо покращення умов праці.....	88
4.2	Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях	90
	ВИСНОВКИ ДО ЧЕТВЕРТОГО РОЗДІЛУ.....	94
	ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ	95
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	97
	ДОДАТОК А	102
	ДОДАТОК Б	107

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизовані системи керування

ТП – технологічний процес

БПЛА – безпілотний літальний апарат

GPS – Global Positioning System

РК – радіо керування

ОПР – особа, що приймає рішення

ВСТУП

Зниження трудомісткості та загальних витрат через впровадження автоматизації є однією з важливих задач модернізації не лише виробничих підприємств, але й сфер обслуговування та побуту. У зв'язку з цим, автоматизація та роботизація життєвих процесів, як засіб підвищення продуктивності суспільства, стає пріоритетним завданням. Для її вирішення необхідно підвищити ефективність, зокрема, і в невиробничій сфері. Одним із шляхів забезпечення ефективності таких технологічних процесів у побуті родини, селища, міста є удосконалення систем комунікацій і послуг. Потреби громадян, що торкаються повсякденного життя та засоби їх задоволення удосконалюються за допомогою інноваційних розробок та автоматизації їх організації, супроводу і їх впровадження як автоматизованих систем керування (АСК).

Успіхи, що демонструються у галузі розвитку безлюдних технологій, а саме мобільних робототехнічних засобів наземного і повітряного використання та зростаюча потреба в них у суспільстві, стимулює пошуки технічних засобів інтелектуального удосконалення для розширення функціональних можливостей [1-3]. Одним із прикладів розв'язку сукупності проблем впровадження безлюдних технологій та забезпечення ефективності і безпеки на дорогах – є аналоги автономного маршрутного планування та навігації в транспортних системах. Зразки розробок: Waymo, Tesla Autopilot, Uber ATG, Baidu Apollo, Mobileye - як приклади реалізації входять до повсякденного життя.

11 років пройшло від миті першого оприлюднення своєї ідеї, директором компанії Amazon Джеффом Безосом, стосовно доставки пакунків клієнтам за допомогою дронів. Однак, навіть сьогодні, коли повітряні дрони практично демонструють свої, тоді неочікувані можливості, зараз стоять ще гостріше. Сукупність інноваційних рішень, що захищено патентами різних компаній і авторів не дало відповідь на цей виклик науково-технічного прогресу. Остаточна система технологічних операцій доставки компанії, структура технічних і законодавчих

рішень стала непередбачуваним основним викликом. Звичайно, вона буде залежати від ряду законодавчих актів, факторів зовнішнього впливу приватної та інших видів власності і упорядкування відносин і технологій, які не придатні бути описані і регламентованими патентами. Так, програма руху безпілотників, яка охоплює велику територію, буде залежати від системи керування повітряним рухом транспортних засобів, задача якої ефективно та безпечно координувати роботу автономних безпілотників у системі повітряного простору. У зв'язку з цим задачі створення АСК стають основою утворюючими задачами подальшого поширення науково-технічного прогресу у сферу побутового використання повітряних дронів.

Метою роботи є підвищення ефективності застосування повітряних дронів побутового призначення шляхом побудови АСК та розширення переліку послуг і введенням додаткових структурних доповнень до працюючих сервісів та послуг, що вже існують на ринку.

Об'єктом дослідження є автоматизація технологічних операцій, що придатні виконувати повітряні безпілотні апарати.

Предметом дослідження є методи, моделі, які дозволять оцінювати і підвищити точність оцінки ефективності технологічних операцій, що придатні виконувати повітряні безпілотні апарати при реалізації побутових задач самостійно та у кооперації із іншими сервісами.

Для досягнення визначеної цілі були сформульовані наступні завдання:

1. Виконати аналітичний огляд літератури та патентної інформації за темою роботи.
2. Обґрунтувати архітектуру АСК та розробити функціональну схему АСК ТП із можливостями залучення і застосування власних та існуючих сервісів.
3. Сформувати блок-схему алгоритму управління виконавчими пристроями залежно від рівня структури, характеристик побутового об'єкту

4. Розробити загальну структуру АСК та схеми: функціональну, бортову систему дистанційного керування по РК дроном та процесом через диспетчерську та бездротові мережі і хмарні сервіси.
5. Розглянути питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях.

РОЗДІЛ I. СТАН, ТЕНДЕНЦІЇ ТА РОЗВИТОК АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ПОБУТОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ ДРОНІВ

1.1 Стан та тенденції розвитку безпілотних літальних апаратів, як елементу АСК для безлюдних технологій побуту

Одним із поширених представників реалізації безлюдних технологій є безпілотні літальні апарати (БПЛА). До них відносяться літальні апарати, які управляються дистанційно, літають автономно, без оператора на борту. Ідея використання радіокерованих літаків для військових цілей з'явилася під час Першої світової війни. Одним з перших проєктів був Kettering Bug, розроблений в США у 1918 році. Це був автономний літак, що призначався для доставки вибухових речовин до цілі на відстані. Впродовж 20 століття різні країни експериментували з дронами для виконання військових ударних та розвідувальних завдань. Передумовами прориву у побутовому використанні дронів став розвиток виробництва легких матеріалів та систем стабілізації польоту, акумуляторів з високою енергоємністю при мінімальних масо-габаритних показниках і вдосконалення систем GPS. Це дозволило створити більш доступні та ефективні моделі для масового ринку (квадрокоптери і мультикоптери).

Квадрокоптери — це тип дрона з чотирма роторами, який надає високий рівень стабілізації та маневреності. Чотири ротори розташовані на жорсткій рамі і працюють синхронно для забезпечення плавного і стабільного польоту.

Мультикоптери — це більш загальний термін, що включає будь-який тип дронів з декількома роторами (більше двох). Вони можуть мати різну кількість роторів, наприклад, трикоптери, квадрокоптери, гексокоптери (6 роторів) та октокоптери (8 роторів).

Перші квадрокоптери розглядалися як одні з найперших літальних апаратів, здатних здійснювати вертикальний зліт та посадку (ЛВЗП). У перших дослідах з роторними літаками зазвичай використовували конструкції з кількома двигунами.

Мультикоптери були першими, що пройшли випробування на вертикальний зліт та посадку, адже ідея застосування декількох роторів вирішувала багато проблем, пов'язаних з польотом. Ранні винахідники вибрали квадрокоптери,

оскільки використання одного хвостового ротора для нейтралізації крутного моменту, створеного одним головним ротором, виявилось складним, неефективним та непрактичним. Хвостовий ротор витрачає від 10 до 15% потужності двигуна, але не сприяє підйому чи горизонтальному руху. Також частина головного ротора, що обертається над фюзеляжем, створює вихідний потік повітря, що знижує ефективність підйому [4-7].

БПЛА є ключовою складовою безпілотної авіаційної системи, що включає в себе дрони, комунікаційні засоби та наземні станції управління. Вони допомагають подолати обмеження, які має наземна система, забезпечуючи кращий доступ, швидкість і надійність. БПЛА спочатку були розроблені для військових цілей, зокрема для розвідки та бойових дій. Однак розвиток цих технологій не лише вирішив військові завдання та технічні проблеми, але й значно розширив можливості їх використання у комерційних цілях. Серед таких цілей — сільське господарство, наукова діяльність, кінематограф, відпочинок, обслуговування, доставка товарів, фотограмметрія тощо.

Зокрема, сільське господарство та інфраструктура займають найбільшу частку у використанні БПЛА. Застосування автономних БПЛА активно розширюється в агробізнесі, зокрема у сферах захисту сільськогосподарських культур, лісового господарства, рибальства та охорони дикої природи [4 - 7]. Сьогодні дрони використовуються в найрізноманітніших сферах: від фотографії та відеозйомки для сільськогосподарських та екологічних досліджень, пошуково-рятувальних операцій, доставки товарів та багато інших. Історія розвитку дронів є прикладом того, як військові технології можуть адаптуватися для побутового та комерційного використання, ставши частиною повсякденного життя. Безпілотні літальні апарати стають дедалі доступнішими для громадськості. Однак разом з цим постають нові виклики, пов'язані з безпекою та захистом прав громадян.

Класифікація БПЛА. Головні класифікаційні ознаки дронів є ціль використання або призначення, принцип забезпечення та дальність польоту, основний механізм, маса корисного навантаження. Технічно дрони можна

розділити на два основних типи: літакові, (Рисунок 1.1.1) та вертолітні (Рисунок 1.1.2).



Рисунок 1.1.1 – Літаковий тип дрона



Рисунок 1.1.2 – Вертолітний тип дрона

Літакові моделі дронів зазвичай мають крила, які забезпечують їм можливість великих та тривалих польотів на значні відстані. У той же час, дрони вертолітного типу (або коптери) оснащені гвинтами. В залежності від кількості гвинтів, коптери можуть бути трикоптерами (з трьома гвинтами), квадрокоптерами (з чотирма гвинтами), гексакоптерами (з шістьма гвинтами) або октокоптерами (з восьми гвинтами) (Рисунок 1.1.3).



А



Б



В

Рисунок 1.1.3 – Мультиротори: А - квадрокоптер, Б - гескокоптер, В - октакоптер.

Мультиротори. Літальні апарати, у які застосовано два та більше гвинтів називаються мультикоптерами. Плавність їх руху надає їм перевагу при зйомках відео чи фото за допомогою легкої камери протягом невеликого проміжку часу. Вони надають простий і бюджетний спосіб отримати "очі у небі" і забезпечують відмінний контроль над камерою, що робить їх ідеальними для аерофотозйомки.

Основним недоліком мультироторів є їх обмежена автономність і швидкість, що робить їх менш придатними для задач, які вимагають широкомасштабного аерокартографування, тривалого моніторингу або інспекції об'єктів на великій відстані, таких як трубопроводи чи електричні лінії.

Технологія мультироторів постійно розвивається, однак їх ефективність обмежена необхідністю витратити значну кількість енергії для протидії гравітації та утримання у повітрі. Сучасні акумулятори дозволяють мультироторам летіти приблизно 20-30 хвилин із легкою камерою. Великі мультиротори можуть переносити більшу вагу, але це скорочує час польоту. Через потребу у швидкісних та точних регулюваннях для стабілізації, використання бензинових двигунів для мультироторів вважається неможливим, тому вибір приводу обмежується електродвигунами.

Однороторний вертоліт. На відміну від мультироторів, які мають кілька гвинтів для підтримки у повітрі, однороторний вертоліт використовує лише один головний ротор та один хвостовий ротор для керування рухом. Цей тип апарату популярний у пілотованій авіації, проте займає лише обмежену нішу у світі безпілотників, що зумовлено потребою застосування другого гвинта з

протилежним напрямом обертання для компенсації моменту. Відомий механізм реалізації такої задачі є складним та таким, що суттєво збільшує вагу приводу в цілому.

Однороторні вертольоти є значно ефективнішими порівняно з багатороторними, оскільки вони можуть використовувати бензинові двигуни, що збільшує їх автономність. Загальне правило аеродинаміки стверджує, що чим більше лопаті ротора і чим повільніше вони обертаються, тим вища їхня ефективність. Це пояснює, чому однороторний вертоліт з великими лопатями, що нагадують скоріше лопаті турбіни, ніж пропелер, є більш ефективним. Якщо вам потрібно забезпечити стійке зависання з великим корисним навантаженням, наприклад, для використання LIDAR сканування, або якщо ви шукаєте оптимальний баланс між тривалістю польоту та швидкістю, то однороторний вертоліт буде мати перевагу.

Тим не менш, їхні недоліками є складність, висока вартість, вібрації та потенційна небезпека від довгих гострих лопатей, що обертаються. Як правило їх обертальний рух може завдати серйозної шкоди при нещасних випадках. Однороторні БПЛА також вимагають ретельного обслуговування і догляду через свою механічну складність, і знаходяться на середині між стабільністю мультироторів і літаків з нерухомим крилом.

Безпілотники з фіксованим крилом. На відміну від дронів з гвинтами, що обертаються, і роторами приводу, ці апарати використовують статичні крила для забезпечення підйому, подібно до традиційних літаків. Це дозволяє їм використовувати енергію виключно для руху вперед, а підйомна сила крил підтримує їх у повітрі. Завдяки цій особливості, безпілотники з фіксованим крилом можуть долати більші дистанції та картографувати великі території. Їхня висока ефективність також дозволяє використовувати газові двигуни, що забезпечують до 16 годин безперервного польоту завдяки високій енергетичній щільності палива.

Основним недоліком дронів з фіксованим крилом є їх нездатність зависати на місці, що обмежує їх використання для деяких видів аерофотозйомки. Також їх

запуск і посадка можуть бути складними, залежно від розмірів. Вони потребують злітно-посадкової смуги або катапульты для зльоту та спеціальні системи для безпечного завершення польоту. Керування таким дроном вимагає певних навичок і досвіду, особливо під час запуску та посадки.

Іншими недоліками є вища вартість та складність у порівнянні з мультироторами, що робить їх менш доступними для громадського і побутового використання.

Гібридні БПЛА з фіксованим крилом. Ця нова категорія поєднує переваги БПЛА з фіксованим крилом з можливістю вертикального зльоту та посадки, як у дронів. Розробки включають різноманітні конструкції, серед яких зустрічаються моделі з фіксованими крилами, обладнані вертикальними моторами для підйому. Інші мають конструкцію "хвостовиків", які на землі стоять вертикально для зльоту, а потім переходять в горизонтальний політ, або ж варіанти з "нахиленими роторами", де ротори або навіть цілі крила можуть обертатися для зміни напрямку з вертикального на горизонтальний.

Один із яскравих прикладів таких технологій — безпілотник Amazon Prime Air. У минулому подібні конструкції були випробувані у 1950-х і 60-х роках для пілотованих апаратів, але виявились занадто складними та важкими для ефективного польоту, інколи з катастрофічними наслідками.

Однак з появою сучасних технологій автопілотів, гіроскопів та акселерометрів, такі нестабільні системи стали керованими завдяки тому, що автопілот забезпечує необхідну стабільність і контроль, спрощуючи управління. Основні переваги та недоліки БПЛА представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки повітряних суден [4 – 11]

Повітряні судна	Переваги	Недоліки	Використання
Мультиротор	<ul style="list-style-type: none"> – доступність; – простота використання БПЛА; – якісний контроль камери; – можливість працювати в обмеженій зоні. 	<ul style="list-style-type: none"> – короткий час польоту; – мала вантажопідйомність; 	<ul style="list-style-type: none"> – аерофотозйомка; – відеоспостереження;
Фіксоване крило	<ul style="list-style-type: none"> – більша витривалість; – велике покриття площі; – велика швидкість польоту; 	<ul style="list-style-type: none"> – для запуску та відновлення потрібно багато місця; – складний в управлінні – висока вартість 	<ul style="list-style-type: none"> – повітряне картографування; – огляд трубопроводів та лінії електропередачі
Однороторний	<ul style="list-style-type: none"> – більша витривалість (з потужністю газу) – більша здатність до корисного навантаження 	<ul style="list-style-type: none"> – більш небезпечні в управлінні – висока вартість 	<ul style="list-style-type: none"> повітряне лазерне сканування

Таким чином, головними тенденціями розвитку БПЛА як елементу АСК у побуті споживача є:

- збільшення автономності;
- покращення плавності руху;
- забезпечення вертикального підйому та посадки, довго тривалого зависання;
- збільшення швидкості та дальності польоту.

1.2 Структурні особливості та визначні характеристики мультикоптерів

За даними літературних джерел, паспортними даними промислових зразків існуючі безпілотні апарати коливаються в розмірах від мікрокоптерів маса яких менше 10 кг до важких з масою до 500кг. Робоча зона мікрокоптерів знаходяться поблизу від оператора, а важких визначається відстанями до 3000 км і висотами до 20 км та автономністю польоту до 24 годин. Основні технічні характеристики, що визначено видом та вагою коптера подано у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Класифікація мультикоптерів

Вид мультикоптера	Вага коптера
Мікро-БПЛА і міні-БПЛА	мають вагу менше 5 кг і здатні віддалятися від оператора на відстань до 40 км;
Легкі БПЛА	мають вагу до 100 кг і здатні відлітати на відстань до 120 км;
Середні БПЛА	мають вагу до 300 кг і можуть перебувати на відстані до 1000 км від оператора;
Середньо-тяжкі БПЛА	мають вагу до 500 кг і здатні відлітати на відстань до 2000 км;
Важкі БПЛА	мають вагу від 500 кг і здатні віддалятися від оператора на відстань до 3000 км.

Крім особливостей, що означено у таблиці 1.2.1 такі як вага та розміри робочої зони які визначають можливості функціонування мультикоптерів для аналізу придатності до створення АСК побуту слід додатково означити і інші. До додаткових технічних характеристик, які визначають потенціальні можливості є: корисні розміри частини рами, що придатна для передбачення кріплення камери, допоміжного устаткування та спеціального кріплення задля транспортування вантажних об'єктів - товарів. Основні характерні розміри рам існуючих коптерів подано та їх застосування узагальнено і подано у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Властивості та застосування мультикоптерів за розмірами рами
[4,7,11]

Довжина мультикоптера	Сфера застосування
Мікро та міні	мають довжину рами менш 250 мм і застосовуються в основному для аматорських цілей
Від 250 до 350 мм	можуть бути обладнані фото- або відеокамерою і здатні розвивати чималу швидкість
Від 350 до 450 мм	здатні піднімати вагу обладнання, достатню для здійснення прямих відео трансляцій
Від 450 до 550 мм	застосовуються для здійснення бізнес діяльності і доставки різних товарів
Від 550 до 750 мм	застосовуються в основному для здійснення наукової діяльності, так як здатні нести на борту достатню кількість дослідницького обладнання
Понад 750 мм	входять в розділ важких коптерів і здатні здійснювати військову діяльність

Як показав аналіз літературних та паспортних джерел призначення та досвід практичного використання мультикоптерів є вирішальним фактором при виборі літального апарату. У зв'язку цим зібрано та узагальнено і подано у таблиці 1.4 призначення та функції, що представляють додаткову інформацію необхідну для набору парку комплектування дронів АСК побуту.

Таблиця 1.4 – Класифікація мультикоптерів за призначенням [4-5, 11-12]

Призначення	Функції квадрокоптера
Аматорські	призначені для пілотування або фото, відеозйомки;
Реалізація для бізнесу	В2В (просування різних послуг компанії) або В2С (має на увазі доставку пошти або різних товарів);
Застосування для наукових досліджень	спостереження за різними об'єктами або збір статистичної інформації
Для силових структур або військових	<ul style="list-style-type: none"> – спостережні; – розвідувальні; – ударні; – бомбардувальні; – радіотрансляційні; – БПЛА РЕБ (для цілей радіоелектронної боротьби); – транспортні; – БПЛА-мішені; – БПЛА-імітатори цілі; – багатоцільові БПЛА.

<p>Моніторинг, дистанційний контроль і спостереження</p>	<ul style="list-style-type: none"> – відеоспостереження з метою охорони різних об'єктів, таких як лісові масиви або посіви фермерів і підприємства сільського господарства; – патрулювання заданих зон поліцією; – картографування земної поверхні; – розвідка і складання планів приміщень за допомогою малих БПЛА всередині зруйнованих або небезпечних будівель; – моніторинг нафтогазових об'єктів, особливо трубопроводів; – відео-фотозйомка важкодоступних промислових об'єктів – опор мостів, димових труб – радіаційна і хімічна розвідка на небезпечних територіях; – екологічний моніторинг атмосфери і поверхні водойм;
	<ul style="list-style-type: none"> – моніторинг небезпечних природних явищ (паводків, виверження вулканів, лавинонебезпечних гірських районів і ін.); – оцінка результатів стихійних лих і ліквідації їх наслідків; – спостереження за дикими тваринами в заповідниках.

1.3 Конструктивні особливості та технічні характеристики парку БПЛА, що придатні для використання у АСК побуту.

Простота та надійність роботи як дві взаємно виключаючи властивості визначають конкретизацію конструкції при формуванні парку дронів. За результатами пошуку рішень для об'єктивної постановки задачі з розробки АСК побутового призначення БПЛА, стає зрозумілим із досвіду перших спроб компанії Amazon та інших, що така задача є задачею комбінованого застосування безлюдних технологій. У зв'язку з цим було проведемо додатково перш за все аналіз функціональних можливостей та характеристик БПЛА, а вже потім як доповнюючі елементи буде розглянуто та вивчено інше устаткування. На рисунку 1.3.1 представлено гексакоптер Yuneec Typhoon H Pro RealSense RTF.



Рисунок 1.3.1 – Гексакоптер Yuneec Typhoon H Pro RealSense RTF

Основні технічні характеристики гексакоптера Yuneec Typhoon H Pro RealSense RTF зібрані в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики Гексакоптер Yuneec Typhoon H Pro RealSense RTF

Характеристики гексакоптера Yuneec Typhoon H Pro RealSense RTF	
Довжина	500 мм
Висота	295 мм
Двигун	безколекторний, Brushless 850 KV
Акумулятор	5400 мАч
Час польоту	До 25 хв
Регулятор струму двигуна	Brushless ESC 15 A
Додаткові характеристики	швидкість до 70 км / год
Радіус дії апаратури	до 2500 м
Вага	1900 г

Як видно з таблиці 1.5 головними технічними характеристиками, що вирізняють гексакоптер взагалі та Yuneec Typhoon H Pro RealSense RTF має шість двигунів, що робить його надійним і захищеним від повної відмови у наслідок зупинки навіть двох двигунів. Його габаритні розміри 500x295 роблять придатним для роботи з крупними пакетами, але у той же час роблять не придатним для проходження у щілини і отвори таких малих розмірів. Також мала автономність 25 хвилин та обмежена дальність радіусу дії апаратури зв'язку 2,5 км обмежує розміри робочої зони. У зв'язку з цим його впровадження буде потребувати стійкої комунікації через сервіси хмарної бездротової мережі або розбудови власної стільникової мережі або дротової із розподіленою системою передавачів. Однак, максимальна відстань 2,5 км, чи радіус 1,25 км робочої зони, буде потребувати застосування наземних дронів. Вони як безумовна додаткова складова, придатна

розширити функціональні можливості АСК, тому у подальшому буде потребувати додаткового дослідження. Таким чином, Застосування столів замовлень або наземних дронів також як додаткових столів перехоплення може бути корисно і для перевезення і малих пакунків. Їх перерозподіл і пересилка безпосередньо до споживача економічно доцільна буде малими і середніми дронами. Так наприклад DJI Mavic 2 Pro. Характеристики для оцінки його можливостей подано на рис. 1.3.2 – 1.3.6 та у таблиці 1.6.-1.9.



Рисунок 1.3.2 – Квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro

Таблиця 1.6 – Технічні характеристики квадрокоптера DJI Mavic 2 Pro

Характеристики DJI Mavic 2 Pro	
1	2
Довжина	322 мм
Висота	84 мм
Акумулятор	3850 мАч
Час польоту	31 хвилина (при послідовній 25 км / год)
Висота польоту	500 м
Радіус дії апаратури	5 км

DJI Mavic Air Fly More Combo Arctic White

Рисунок 1.3.3 – DJI Mavic Air Fly More Combo Arctic White

Основні технічні характеристики DJI Mavic Air Fly More Combo Arctic White представлені в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Технічні характеристики DJI Mavic Air Fly More Combo Arctic White

Характеристики DJI Mavic Air Fly More Combo Arctic White	
Довжина	168 мм
Висота	64 мм
Двигун	безколекторний
Акумулятор	2375 мАч
Час польоту	30 хвилин, 21 хвилина (при швидкості 25 км / г)
Камера	Знімає UHD-відео в 4K зі швидкістю 30 кадрів / с при 100 Мбіт / с. Запис відео з ефектом уповільненої дії, 1080p при 120 кадрах / с.

DJI MAVIC AIR COMBO ONYX Black



Рисунок 1.3.4 – DJI MAVIC AIR COMBO ONYX Black

Основні технічні характеристики DJI MAVIC AIR COMBO ONYX Black зібрані в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Технічні характеристики DJI MAVIC AIR COMBO ONYX Black

Характеристики DJI MAVIC AIR COMBO ONYX Black	
Довжина	168 мм
Час польоту	21 хвилина
Висота польоту	500 м
Радіус дії апаратури	4 км
Вага	430 г
Стабілізація	Діапазон кутових коливань не перевищує $0,005^\circ$
Додаткові характеристики	Карданні амортизатори які встановлені в трикутної формації, дозволяють робити більш стійкі знімки і відео навіть у випадках різких маневрів в повітрі.

Parrot Bluegrass

Рисунок 1.3.5 – Parrot Bluegrass

Основні технічні характеристики Parrot Bluegrass представлені в таблиці 1.9.

Таблиця 1.9 – Технічні характеристики Parrot Bluegrass

Характеристики Parrot Bluegrass	
Розмір	35 x 40 x 14 см
Діапазон	до 2-х км з Parrot Skycontroller 2, в безперешкодної зоні без перешкод, WiFi AC-type, 2 дводіапазонних антени (2,4 і 5 ГГц)
Час польоту	25 хв
Акумулятор	Lіпо 6700 мАг
Камера	Вертикальна камера 14MP з оптичним потоком. Відео: 1080p Full HD. Потоківідео: 360p / 720p.
Внутрішня пам'ять	32 ГБ
Вага	1800 г

1.4 Аналіз патентних рішень, обґрунтованість використання та перспективні конструкції і технології застосування дронів у побуті.

Від миті першого оприлюднення своєї ідеї директором компанії Amazon Джеффом Безосом доставляти пакунки клієнтам за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) пройшло 11 років. Тоді багато хто одразу швидко запитав, як така смілива пропозиція взагалі може працювати на практиці. Однак, навіть сьогодні, коли повітряні дрони практично демонструють свої, тоді неочікувані можливості, аналогічні питання постають ще гостріше. Сукупність інноваційних рішень, що захищено патентами різних компаній і авторів не дає відповідь на цей виклик науково-технічного прогресу. Система технологічних операцій доставки компанії, як остаточна структура, що виходить на ринок загальмована, оскільки система технічних і законодавчих рішень стала непередбачуваним основним викликом.

Звичайно, технологія застосування БПЛА у побуті буде залежати від ряду законодавчих актів, факторів зовнішнього впливу приватної та інших видів власності і упорядкування відносин і технологій, які не придатні бути описані і регламентованими патентами. Так, програма руху безпілотників, яка охоплює велику територію, буде залежати від системи керування повітряним рухом транспортних засобів, задача якої ефективно та безпечно координувати роботу автономних безпілотників у системі повітряного простору. У зв'язку з цим задачі створення АСК стають основними задачами подальшого поширення науково-технічного прогресу у сферу побутового використання повітряних дронів. Однак незважаючи на те, що на сьогодні компанією Amazon захищено багато патентів, їм не вдалось описати та законодавче визначити детальні елементи доставки безпілотниками. Прогресивною тенденцією є залучення до процесу реалізації безлюдної технології побутової послуги, яку виконує дрон додатково технології визначення місце знаходження покупця-замовника за смартфоном. Так у 2015 році Патентне відомство США опублікувало патент поданий компанією Amazon у 2013 році [24] (рис 1. 4. 1.)

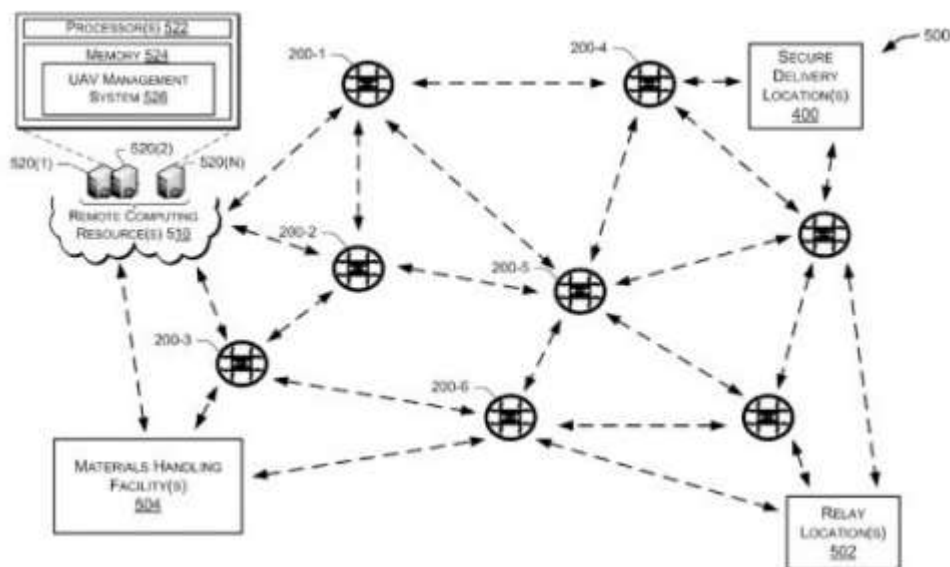


Рисунок 1.4.1 – Система доставки за патентом [24]

Цей патент описує запропоновану компанією систему доставки. Згідно з ним, дрони літатимуть безпосередньо до покупців для чого використовують дані про місцезнаходження за смартфонами покупців. Крім того, користувачі зможуть вибрати ряд місць доставки, включно з домом, робоче місце, або навіть човен. Патент пояснює, що безпілотники з'єднуюватимуться між собою, щоб інформувати один одного про погодні умови. Нарешті, патент описує, як дрони будуть активно стежити за перешкодами, які виникатимуть внаслідок дій тварин та людей.

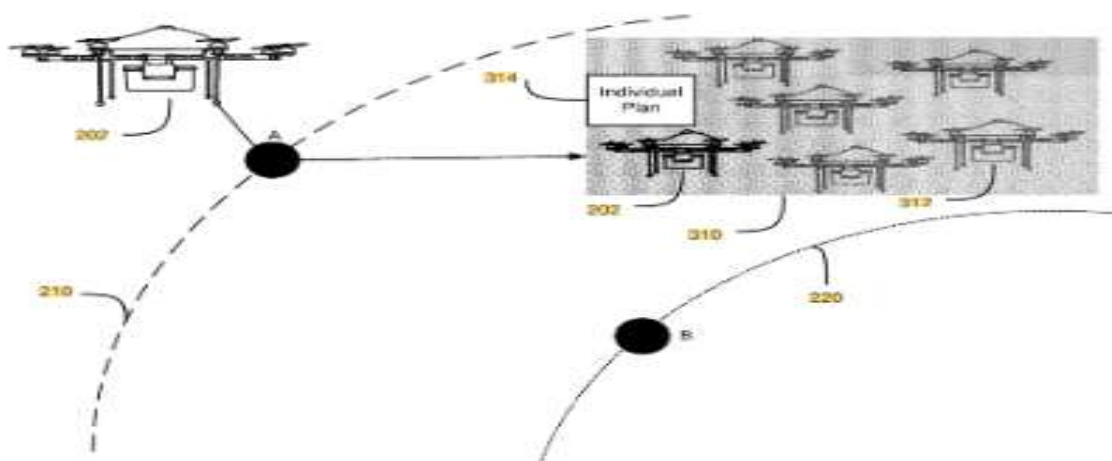


Рисунок 1.4.2 – Система повітряної доставки за патентом [25]

Другим важливим патентом [25] визначено «множину» дронів доставки, що з'єднано з центральним вузлом управління. Безлюдний вузол керує процесом і чергами та розподіляє доручення замовлень на доставку предметів. Рішення приймається на основі їх відносного розташування до відправника пакету і до кінцевого пункту призначення.

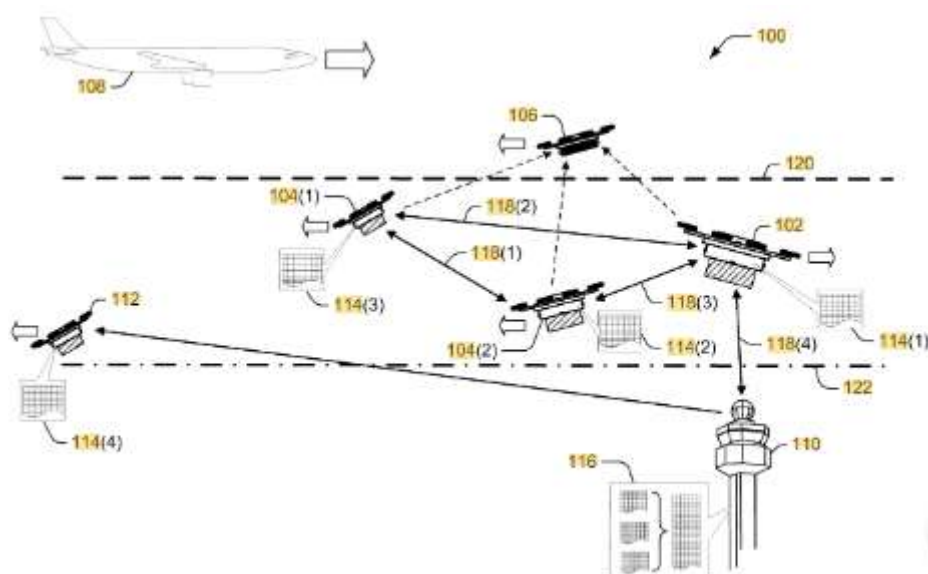


Рисунок 1.4.3 – Сучасна мережа повітряної доставки за патентом [26]

Патент 2017 [26] описує сітчасту мережу, яка з'єднує апарати один з одним та ідентифікує кожне повітряне судно в заданій області. Видано патент компанії в серпні 2017 року [27] описує, як один апарат зможе відстежувати місце знаходження безпілотників, освітлюючи їх яскравим світлом з літака, що рухається, якщо кожен з них укомплектовано світловідбивачами, завдяки яким система обчислює розташування дрона.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Розвиток АСК застосування БПЛА у побуті вимагає перегляду вимог до конструкції та функціональної структури.
2. Реалізація ідеї впровадження безлюдних технологій переміщення об'єктів у побуті за допомогою БПЛА не реалізується без розробки АСК.
3. Ефективне функціонування АСК у побуті, ґрунтується на безлюдних технологіях є задачею комплексного впровадження комплексу наземних і повітряних апаратів і засобів, що реалізують безлюдні технології.

РОЗДІЛ 2 РОЗВИТОК СТРУКТУРИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ АСК ТП ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА

2.1 Розвиток структури АСК ТП застосування БПЛА у побуті

Сьогодні, коли повітряні дрони демонструють свої можливості, які ще декілька років тому були майже неочікувані [28], вони стоять ще гостріше. Сукупність інноваційних рішень, що захищено патентами різних компаній і авторів не дає відповідь на цей виклик науково-технічного прогресу. Система технологічних операцій доставки компанії, як остаточна структура, що виходить на ринок загальмована, оскільки сукупність технічних і законодавчих рішень стала непередбачуваним основним викликом. Звичайно, технологія застосування БПЛА у побуті буде залежати від ряду законодавчих актів, факторів зовнішнього впливу приватної та інших видів власності і упорядкування відносин і технологій, які не придатні бути описані і регламентованими патентами. Так, програма руху безпілотників, яка охоплює велику територію, буде залежати від системи керування повітряним рухом транспортних засобів, задача якої ефективно та безпечно координувати роботу автономних безпілотників у системі повітряного простору. У зв'язку з цим задачі створення АСК стають основними задачами подальшого поширення науково-технічного прогресу у сферу побутового використання повітряних дронів.

Одним із поширених представників реалізації безлюдних технологій є БПЛА. До них відносяться літальні апарати, які управляються дистанційно, літають автономно, без оператора на борту. Однак, для подальшого виключення проблем законодавчих протиріч роботи БПЛА над містом та у місті, було поставлено розширити АСК доповненням з технологією застосування безпілотних наземних роботів перевізників та виконавців вантажно-розвантажувальних операцій. Крім того, систему доповнюємо пунктами прийому та видачі об'єктів перевезення та автоматичного підбору і складування у таких пунктах супермаркетів, аптек та інших установ, що надають послуги які потребують доставки.

Аналітичний огляд та висновок за його аналізом ідею Amazon переформулює у нову концепцію будови застосування БПЛА у побуті. Одним із функціональних рішень є пропозиція, що пропонується в магістерській роботі. Визначальною її рисою є об'єднання та доповнення існуючих успішних простих сервісів поштових доставок із новітніми елементами БПЛА сервісу. Скорочення шляху за рахунок вибору переміщень у напрямках дозволених безпілотних польотів та планування безпілотних наземних переміщень електрокарами, надає можливість гнучко усувати правові перешкоди. Графічне відображення функціональної схеми, що демонструє нову концепцію представлено на рис. 2.1.1.

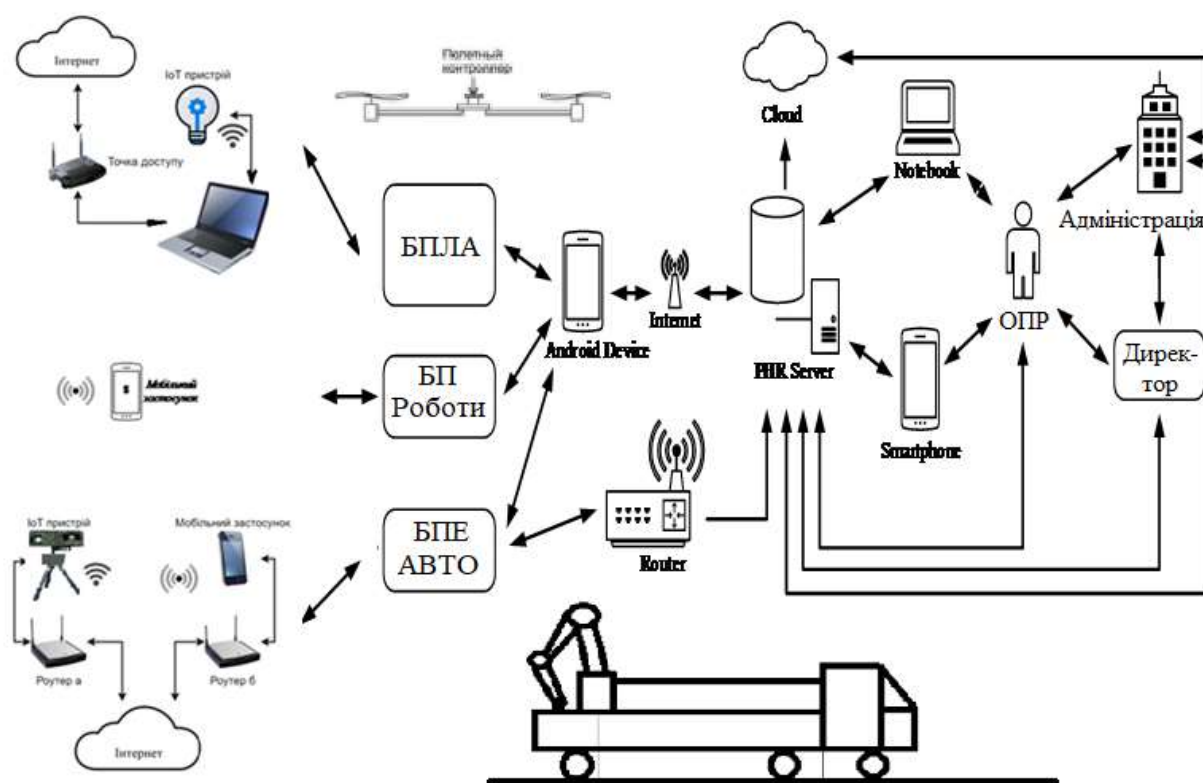


Рисунок 2.1.1 – Функціональна схема АСК ТП застосування БПЛА у побуті

Утворення мережі сервісних центрів, що розподілені по території надання послуг забезпечує їх ефективну інформаційну комунікацію. Завдяки радіо каналів зв'язку Bluetooth та Wi-Fi та бездротовим мережам і за допомогою хмарних сервісів у тому числі і IoT забезпечується двох сторонній інформаційний обмін. Крім сервісних центрів вводяться автоматизовані ділянки завантаження БПЛА, БП

роботи, БПЕ авто, які завантажують засоби доставки за оптимальними видами доставок. Споживачі як потенціальні замовники теж об'єднані через застосунок, що встановлено на смартфон (андроїд). Всі учасники безлюдної АСК ТП побуту контролюються та їх операційні просування протоколюється і зберігається на сервері. Особа, що приймає рішення (ОПР) через інтерфейс інформаційно підтримується та при необхідності втручається у процес. Адміністрація теж веде процес відстежує стан системи та парку устаткування за допомогою технічних, інженерних служб і ремонтних фахівців (на рисунку вони умовно не відображені).

Таку функціональну схему рис. 2.1.1, що представляє графічними образами функціональні елементи безлюдної АСК ТП побуту, деталізує блок схема, яка відображає зв'язки між функціональними блоками. Ці функції, що відображено входами, виходами керуючими впливами та збуреннями позначимо відповідно вектори \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{U} , \mathbf{W} . Також введемо нижні та верхні індекси та умовно приймемо, нижній позначає блок з якого вийшла величина, а верхнім до якого вона подається. Так, наприклад, якщо необхідно подати координати відносно базової системи координат та кути орієнтації апарату у початковому положенні, що задано вихідним вектором з першого блоку \bar{Y}_1 то будемо писати:

$$\bar{Y}_1 = [X_1, Y_1, Z_1, \theta_1, \varphi_1, \psi_1]^T .$$

З цього прикладу видно, що це вихідний сигнал з першого блоку. Однак для

Також виникає необхідність задати величину \bar{Y}_2 вектору положення і орієнтацію апарату у кінцевому положенні 2:

$$\bar{Y}_2 = [X_2, Y_2, Z_2, \theta_2, \varphi_2, \psi_2]^T .$$

Для усунення таких проблем тлумачення будемо вводити подвійну індексацію для верхніх і нижніх індексів.

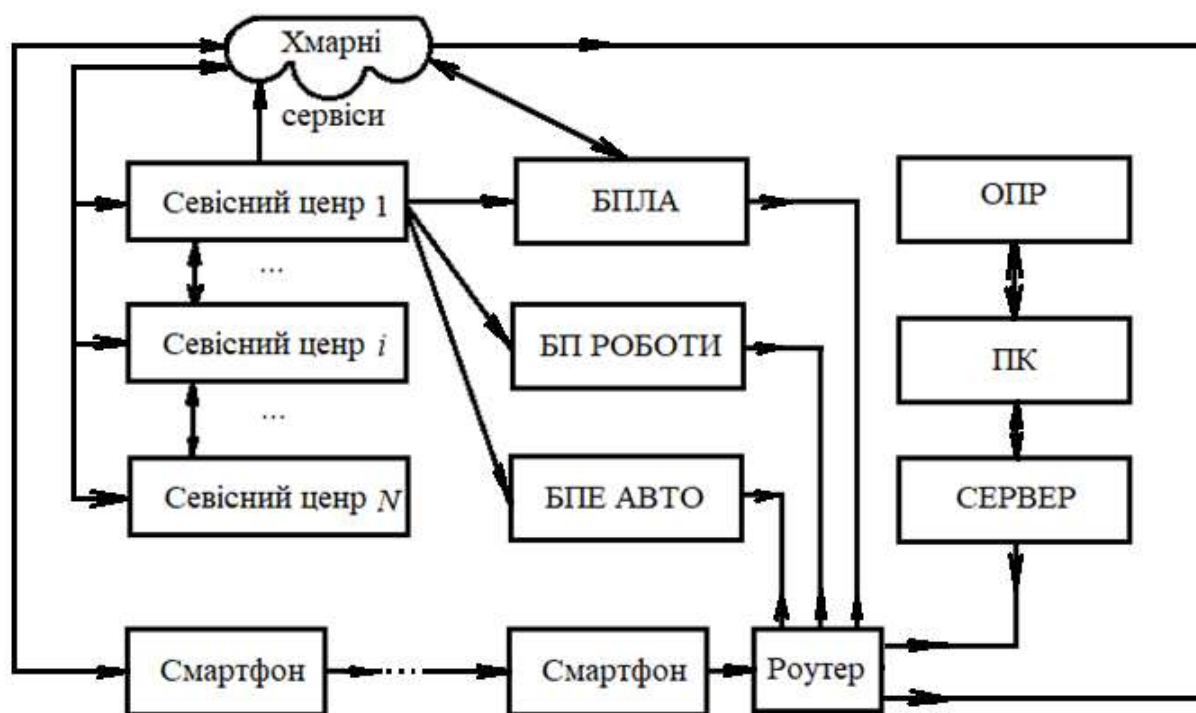


Рисунок 2.1.2 – Блок-схема АСК ТП застосування БПЛА у побуті

Графічне відображення блок схеми, що демонструє нову концепцію представлено на рис. 2.1.2. для її формування введено літерно-цифрове символічне позначення, у майбутньому та спростить роботу оператора і особи, що приймає рішення (ОПР) та тлумачення станів АСК за даними інтерфейсу, який буде необхідно створити.

Головними визначальними структурними елементами є N сервісних центрів, які створюються окремо або використовуються існуючі центри автоматизованих послуг, що додатково пристосовуються до роботи з АСК ТП побуту. Ці центри інформаційно-пов'язані із бездротовими мережами і обслуговуються хмарними сервісами у тому числі через застосунки «Андроїдних» смартфонів та роутери шляхом двосторонніх обмінів. Виходи з сервісних центрів подаються на входи відповідних автоматизованих ділянок завантаження БПЛА, БП роботи, БПЕ авто відповідно до завдань та інформаційних доповнень від ОПР, хмарних мереж, серверу та стану ділянки.

Представлена блок схема умовно не відображає вишки, антени зв'язку за радіо каналами та дротову мережу Інтернет, оскільки функціонально їх роль у роботі АСК ТП послуг побуту на цьому етапі не є суттєвими.

За алгоритмом функціонування АСК ТП побуту ПК на підставі замовлень, що отримано через бездротові мережі смартфонів, та з урахуванням інформації про замовлення та завантаженість і хід виконання замовлень кожним із типів ділянок і безлюдним дроном повітряного або наземного типу або роботом керує виконанням послуг. Таким чином функціональна схема рисунок 2.1.2 є разом з введеною системою означень основою концептуальної моделі.

2.2 Особливості структури БПЛА як спеціалізованого елементу АСК ТП побутових послуг

На підставі аналітичного огляду, досвіду Амазон та висновку за його аналізом висунуто пропозицію, що парк БПЛА побуту повинен містити як конвертоплани так і планери багато-роторні машини для реалізації концепції застосування БПЛА послуг у побуті.

Перший тип БПЛА має схемою польоту конвертиплану, що забезпечує вертикальний зліт та горизонтальне переміщення за рахунок зміни конфігурації крила. Така комбінація схем знімає потребу наявності злітно-посадкових смуг.

Друга планерна схема здебільшого стосується пристроїв без двигунів, які скидаються з більш важкої машини і рухаються за визначеною траєкторією, але вона може бути доповнена малопотужним двигуном. Такий тип підходить для пошуково-інспекційних завдань. Силова установка кріпиться в корпусі, де також розміщується керуюча електроніка, засоби управління та зв'язку. Інформація для оператора і програмного забезпечення надходить від різних типів датчиків, таких як лазерні, звукові, інфрачервоні та інші. Навігація проводиться за рахунок GPS і електронних карт. Сигнали датчиків про навколишнє середовище після первинного

перетворення використовуються в системі керування бортового комп'ютера та корекції команд, наземного типу які передаються теж на виконуючі пристрої, наприклад, керма висоти та двигуни.

За конструкцією парк БПЛА повинен містити наступні види:

- БПЛА з фіксованим крилом. До їх переваг можна віднести велику дальність і швидкість польоту.
- Мультикоптер. Вони можуть мати різну кількість пропелерів: від 2-х до 8-ми. Пропелери у деяких моделей можуть складатися.
- БПЛА вертолітного типу та конвертоплан.

Безпілотні літаючі пристрої в більшості випадків складаються з наступних основних елементів:

- Акумуляторна батарея.
- Пристрій регулювання обертів гвинта.
- Пропелер або пропелери.
- Двигун.
- Польотний контролер.
- Рама.

Основним елементом літаючого апарата є рама, на яку встановлюються всі компоненти. В більшості випадків, раму виготовляють з полімерів або різних металевих сплавів. Польотний контролер керує дроном, отримуючи сигнали від пульта дистанційного керування. Контролер містить процесор, інші необхідні елементи та набір датчиків: барометр для визначення висоти, акселерометр, гіроскоп, GPS-навігатор, оперативну пам'ять та пристрій для прийому сигналу.

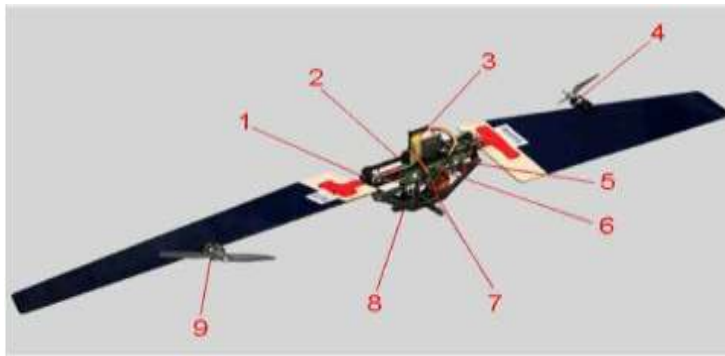


Рисунок 2.2.1 – Вид конструкції БПЛА типу THOR

1 – підшипник; 2 – привід; 3 – акумулятор; 4,9 – мотори; 5 – електронний контроль стійкості (ESC); 6 – контролер польоту; 7 – IMU; 8 – ESC - 2

Двигуни, регулятори та пропелери забезпечують політ БПЛА. Регулятор задає швидкість руху апарата. Акумулятор є джерелом енергії для двигуна та інших компонентів дрона. Комерційні та споживчі БПЛА керуються за допомогою пульта керування. Військові моделі можуть керуватися як за допомогою пульта, так і через супутникові системи.



Рисунок 2.2.2 – Конструкція БПЛА у залежності від типу має різні елементи

1,2,3 – силові двигуни та гвинти; 4 – карданний підвіс; 5 – активна камера; 6 – відсік з батареєю живлення; 7 – лапа.

Загальна структура і конструкції наземних БПА відрізняються від літаючих. Більшість розробників надають перевагу використанню вже існуючих транспортних засобів, які удосконалюються шляхом вбудовування засобів управління, камер, сенсорів і датчиків для створення БПА. За ступенем автоматизації ці пристрої можуть бути повністю автономними або частково чи повністю керованими людиною на відстані. Проте, цей підхід не завжди є виправданим, оскільки не завжди призводить до кращих результатів. Структурні елементи цивільних машин, розроблених з урахуванням основних вимог, включають наступні компоненти:

- звукові, інфрачервоні, лазерні, і інші датчики;
- навігація як розширена база даних і ПЗ керування нею, що також об'єднує електронні карти і GPS систему;
- сервер з акумуляторами і ПЗ;
- автоматизовані органи керування, до складу яких входять система управління двигуном, управління кермом, система гальм та трансмісія і редуктори.

Бездротова мережа, через яку може відбуватися управління, завантажує програми, карти та інші дані. Радіо керування (РК) як принцип та системи, що його реалізують широко розповсюджені. Їх різні різновиди використовуються на виробничих роботизованих ділянках, у галузі охоронних послуг, при роботі з мобільними робото-технічними виробничими та транспортними системами або окремими дронами та у інших галузях господарювання і розваг. Прикладом промислової системи дистанційного РК, є системи управління транспортними засобами перевезення вантажними кранами виробничих ділянок або завантаження і розвантаження вантажів. Оператор може знаходитися на відстані до 90 метрів від об'єкту керування і успішно їм керувати. Такий варіант системи РК включає в себе наступні базові елементи:

- кнопочний пульт керування з шістьма командними кнопками: включення, виключення, аварійної зупинки, керування переміщенням та інших елементів захисту;

- блок приймача, що розміщується без посередньо на об'єкті до систем якого його інтегровано.

У більшості випадків узагальнену структуру промислових систем радіо керування можливо розбити на дві окремі структурні підсистеми. Ці підсистеми як базові є окремими частинами, що можливо поділити на систему дистанційного керування і пульт дистанційного керування. Зв'язок між ними здійснюється через радіоканал. Варіант реалізації структурної схеми системи дистанційного керування по радіо каналу показаний на рис. 2.2.3.

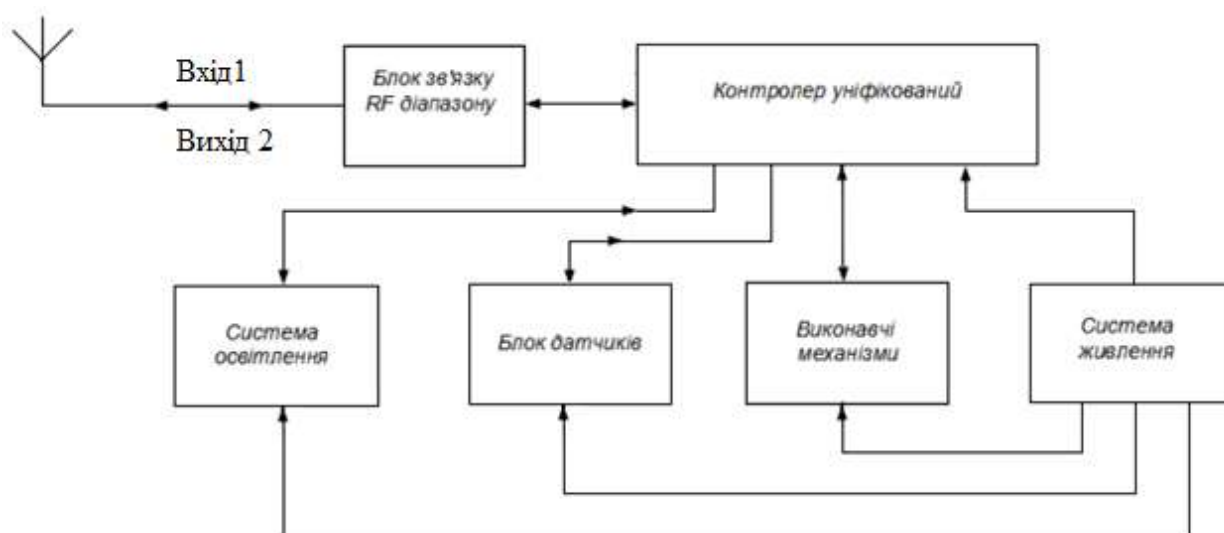


Рисунок 2.2.3 – Узагальнена структурна схема системи дистанційного керування по РК

На сьогоднішній день такі системи здебільшого реалізуються з використанням програмного керування. Тобто всю систему радіокерування можна розділити на апаратну та програмну частини. Апаратна частина системи радіокерування зображена на рис. 2.2.3. Програмна складова системи РК призначена для управління блоком уніфікованого контролера та представлена у формі блок - схеми на рис. 2.2.4. Підключення уніфікованого контролера пульта дистанційного керування розкрито на функціональній схемі рис.2, що демонструє

спрощений модуль контролера, який містить сигнальний світлодіод і кнопки панелі керування. Всі ці елементи підключаються і управляються програмно через порти вводу-виводу загального призначення.

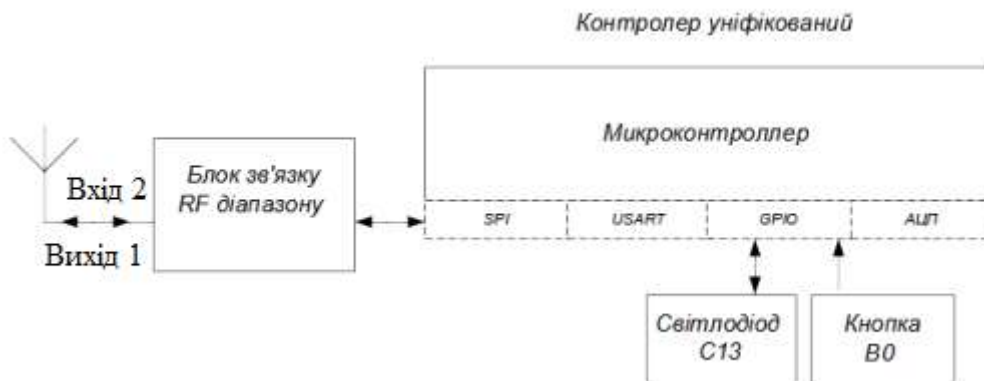


Рисунок 2.2.4 – Узагальнена структурна схема системи радіокерування (варіант)

На рис. 2.2.4 показано, що блок радіодіапазону підключається до мікроконтролера через послідовний порт SPI, який є найшвидшим портом управління в типовому мікроконтролері або мікрокомп'ютері. Системи радіокерування призначені для забезпечення управління на основі двостороннього радіозв'язку. У більшості випадків радіокерування промислових систем здійснюється на невеликих відстанях (short range device, SRD) або на відстанях прямої видимості. Основною вимогою до частотного діапазону таких систем є те, що вони не повинні створювати перешкод іншим електронним системам і не заходити на ліцензійні частоти. Окрім систем радіокерування наземними рухомими об'єктами, промисловими системами та повітряними пристроями, такі системи використовуються для виконання наступних завдань: дистанційне підключення датчиків, робота в системах охоронної сигналізації, у автомобільній промисловості тощо.

Наразі актуальними для радіокерування (РК) є неліцензовані частоти, які можна використовувати для систем загального і промислового призначення. Привабливість таких частот полягає в тому, що не потрібно отримувати додатковий дозвіл від спеціалізованих органів державного управління.

До таких діапазонів належать: Діапазон 13.56 МГц, який забезпечує зв'язок на коротких відстанях. Діапазон 40 МГц, раніше використовувався для бездротових телефонів. Діапазон 433 МГц, популярний діапазон, який забезпечує зв'язок на відстані 1-2 км і не вимагає особливих вимог для реалізації НВЧ пристроїв. Діапазон 868/915 МГц, актуальний для Європи, США, Канади, Австралії. Діапазон 2.4 ГГц, поширений для стандартів IEEE 802.11 та Bluetooth, а також для промислової, наукової та медичної галузей. Діапазон 5.8 ГГц, використовується для стандарту IEEE 802.11.

Кожен діапазон має певну смугу для налаштування. Наприклад, для захисту від побутових і промислових радіоперешкод у деяких діапазонах застосовується метод перестрибування частот (frequency hopping, FH). Для цього дозволений діапазон розподіляється на певну кількість частот (наприклад, на 79), і передавач системи РК налаштовується на іншу частоту за псевдовипадковим алгоритмом з певною швидкістю. Діапазон 5.8 ГГц краще захищений від промислових радіоперешкод. На діапазоні 2.4 ГГц працює багато мікросхем, які реалізують програмоване радіокерування, мають невисоку вартість і добре керуються через інтерфейс SPI, як показано на рис. 2.

Загалом, неліцензовані радіокерування діапазони, доступні для використання без спеціалізованого дозволу, можна віднести до класу Industrial, Scientific, Medical (ISM), до якого належать такі діапазони:

Промисловий (Industrial): 902 – 928 MHz (ширина 26 MHz).

Науковий (Scientific): 2400 - 2500 MHz (ширина 100 MHz).

Медичний (Medical): 5725 - 5875 MHz (ширина 150 MHz).

Всі перелічені діапазони можуть бути взаємозамінними. Вибір відповідних відкритих частотних діапазонів є одним із ключових завдань під час проектування апаратних складових для радіоканалу системи управління. Для програмного управління модулем радіоканалу потрібно використовувати мікроконтролери. Наведений нижче код для мікроконтролерів серії stm32f10x може бути основою для

вирішення програмної складової роботи у варіанті нескінченного циклу опитування.

2.3 Ефективність АСК ТП застосування БПЛА у побуті та потреба просторового моделювання його руху

Однак, навіть сьогодні, коли повітряні дрони практично демонструють свої, тоді неочікувані можливості, правові основи роботи дронів як повітряних апаратів стоять ще гостріше. Сукупність інноваційних рішень, що захищено патентами різних компаній і авторів не дає відповідь на цей виклик науково-технічного прогресу. Система технологічних операцій доставки компанії, як остаточна структура, що виходить на ринок загальмована, оскільки система технічних і законодавчих рішень стала непередбачуваним основним викликом [4]. Звичайно, технологія застосування БПЛА у побуті залежить від ряду законодавчих актів, факторів зовнішнього впливу приватної та інших видів власності і упорядкування відносин і технологій, які не придатні бути описані і регламентованими патентами [5]. Так, програма руху безпілотників, яка охоплює велику територію, буде залежати від системи керування повітряним рухом транспортних засобів, задача якої ефективно та безпечно координувати роботу автономних безпілотників у системі повітряного простору. У зв'язку з цим задачі створення АСК стають основними задачами подальшого поширення науково-технічного прогресу у сферу побутового використання повітряних дронів [6]. Одним із поширених представників реалізації безлюдних технологій є БПЛА. До них відносяться літальні апарати, які управляються дистанційно, літають автономно, без оператора на борту. Однак, для подальшого виключення проблем законодавчих протиріч роботи БПЛА над містом у місті було поставлено розширити АСК доповненням технологією застосування безпілотних наземних роботів перевізників та виконавців вантажно розвантажувальних операцій. Крім того, систему доповнюємо пунктами прийому та видачі об'єктів перевезення та автоматичного підбору і складування у таких пунктах супер маркетів, аптек та інших установ, що надають послуги які потребують доставки. Для детального моделювання таких

систем було досліджено вплив різних факторів на ефективність операцій та загальну ефективність від діяльності вузла забезпечення послуги. Загальна ефективність технологічного процесу, що складається із N видів послуг дорівнює:

$$E_{заг} = A_{заг} P_{заг} \left(T_{заг} \sum_{i=1}^N C_i \right)^{-1}$$

Обчислення загальної ефективності технологічного процесу завжди ускладнюється як проблемами поділу на операції, так і підрахунком ефективності кожної з них. Однак якщо такі відомі, то просто підрахуємо загальну ефективність.

$$E_{заг} = \frac{A_{заг} P_{заг}}{T_{заг}} \left(\sum_{i=1}^N \frac{A_i P_i}{T_i E_i} \right)^{-1}.$$

Означене демонструє, що не завжди відомі значення загальних показників, тому легше проводити оцінку по абсолютним показникам. У зв'язку з цим було складено модель операції. Так позначимо m - масу вантажу, що потрібно перевезти від точки розташування до точки вручення споживачу. Є ще переліт від точки знаходження апарату до точки знаходження вантажу, а також переліт від точки вручення споживачу до точки паркінгу апарату. За цих умов, при відомому куті диференту ψ сумарна робота, що виконали чотири рушії наприклад квадрокоптера розрахується:

$$A = (x_2 - x_1) \left[2 \left(\frac{1}{2} \rho S C_x n_1^2 r_1^2 \right) + 2 \left(\frac{1}{2} \rho S C_x n_3^2 r_3^2 \right) \right] \cos \psi + (y_2 - y_1) \left[2 \left(\frac{1}{2} \rho S C_x n_1^2 r_1^2 \right) + 2 \left(\frac{1}{2} \rho S C_x n_3^2 r_3^2 \right) \right] \sin \psi =$$

$$= 2 \rho S C_x r_1^2 (n_1^2 + n_3^2) \left[(x_2 - x_1) \cos \psi + (y_2 - y_1) \sin \psi \right]$$

Загальні витрати на виконання цієї операції складуть:

$$C = C_e + C_{ay} + C_{ep}$$

Витрати на електроенергію вартістю V_e , витрачається на зарядку акумуляторної батареї:

$$C_e = V_e \left(\frac{I_d U_{\partial t \partial}}{\eta_d} + I_a U_{at_a} + I_{ocb} U_{ocb t_{ocb}} \right)$$

Амортизаційні відрахування на все задіяне устаткування

$$C_{ay} = \mu_i V_i \frac{T_{oc1} + T_{мон}}{T},$$

де μ_i - коефіцієнт амортизаційних відрахувань для i -того устаткування, V_i - балансова вартість i -того устаткування, T_{oc1} - час на виконання операції, $T_{мон}$ - час на зберігання між двома операціями, T - загальний час роботи між двома капітальними ремонтами або планової заміни.

Витрати на пряму заробітну плату виконавцям робіт з урахуванням податків:

$$C_{ар} = (1 + \nu) \sum_{i=1}^N 3\Pi_i (T_{oc1} + 3\Pi_i T_z),$$

ν - нарахування на заробітну плату.

Загальний час операції позначимо $T_{заг}$, тоді для підрахунку ефективності лишається знайти ймовірність доставки вантажу від точки 1 до точки 2 за заданий час $T_{заг}$.

Задачу можливо розв'язати шляхом експериментальних випробувань або теоретично, шляхом підрахунку ймовірності попадання випадкової величини до інтервалу $[T_{заг} - \Delta T, T_{заг} + \Delta T]$:

$$P = \int_{T_{заг} - \Delta T}^{T_{заг} + \Delta T} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau - m)^2}{2\sigma^2}} d\tau,$$

m - математичне очікування часу виконання операції, σ - середньо квадратична похибка, ΔT - оцінка розбіжності часу виконання операції за даними відхилень швидкості. Вказані величини слід описувати наступним чином:

$$T_{заг} = \frac{\sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2 + (z_2-z_1)^2}}{v_{сер}};$$

$$\Delta T = \frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2 + (z_2-z_1)^2}}{v_{мін}} - \frac{\sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2 + (z_2-z_1)^2}}{v_{мак}} \right]$$

Закон розподілу прийнято нормальним, оскільки діє декілька рівнозначних випадкових факторів як вітер, погодні умови, завантаженість, готовність устаткування і так далі. Запропонована модель є гнучкою і придатною для експрес і точних обчислень у ході моделювання роботи та обчислення загальної ефективності технологічного процесу, що складається із N видів послуг. Для забезпечення роботи вузлів виникає необхідність застосування спеціальних контролерів та одно-платних комп'ютерів, що придатні до довготривалої безперервної роботи у складі АСК побутових послуг, які використовують безлюдні технології і дрони. Крім того, вони повинні бути соціально доступними, мати широкі бібліотеки програм та програмне забезпечення з відкритим кодом, які останнім часом демонструють мікрокомп'ютери Weidmüller, Jetson Nano, Arduino та інші.

Для проведення імітаційного моделювання роботи побутових дронів у складі комбінованих послуг доставки різної дальності розглянемо ділянку міста, що схематично відображено на рис. 2.3.1.

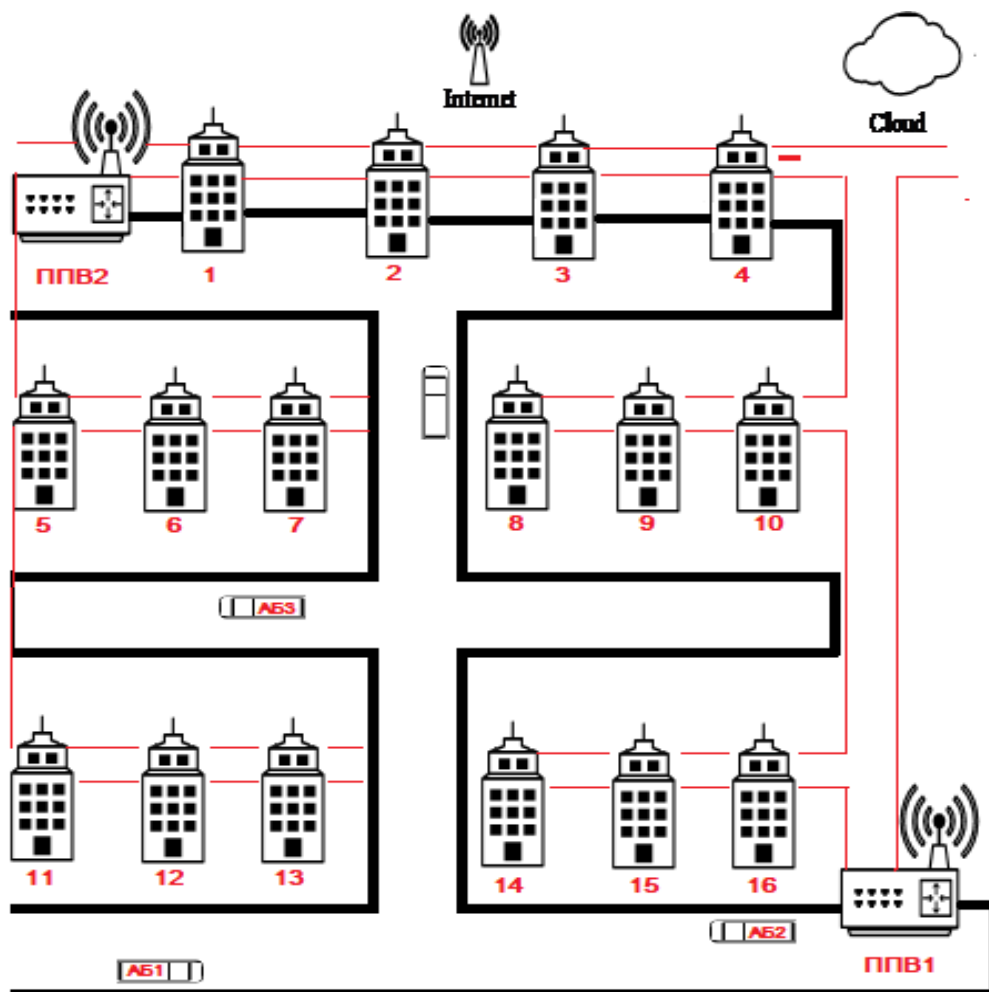


Рисунок 2.2.3 – Узагальнена структурна схема мікрорайону міста та пунктів комплексного обслуговування

На рисунку 2.2.3 чорними товстими лініями показано границі автомобільної дороги, червоними тонкими лініями границі зони дозволеної для руху БПЛА. Позначеннями ППВ за номерами 1, 2 і так далі позначено пункти прийому та видачі об'єктів пересилки. Позначення АБ із порядковими номерами позначено автомобілі безпілотні, що здатні перевозити об'єкти пересилки. Координати будівель і точок доставки умовно позначено цифрами, що далі будуть визначати нижніми індексами координати цих точок. Припускається що всі будівлі пункти прийому та видачі об'єктів пересилки, автономні безпілотні комплекси працюють з безпілотними комплексами через хмарні сервіси, дротові і бездротові мережі та смартфони споживачів.

Для моделювання виберемо приклад доставки до споживача об'єкт масою 30 кг, споживач знаходиться у будинку 1 на 27-мому поверсі, висота поверху 3,5 м. Доставку необхідно здійснити від ППВ1 першого поверху. Позначимо початкові координати вантажу: $X_1=0, Y_1=0, Z_1=1$ м. Координати замовника: $X_2=-500, Y_2=2500, Z_2=92,0$ м. Результати моделювання зведемо до таблиці 1.

Таблиця 2.1. Результати імітаційного моделювання операцій комбінацією безлюдних технологій

№	Тип способу	Собівартість 1км переміщення, грн	Загальні витрати С, грн.	Час виконання операції Т, год.	Кінцева точка X,Y,Z, м	Імовірність виконання,
1	Автодрон	60	180	0,075	-500, 2500,1	1
2	БПЛА	45	135	0,083	-500, 2500,1	1
3	Робот	360	1080	0,5	-500, 2500,1	1
4	Авто дрон	60	180	0,075	-500, 2500,1	1
5	БПЛА	45	4,725	0,0029	-500, 2500, 105	1
6	Робот	360	33,12	0, 1	-500, 2500, 92	1
7	У комплексі за п. 4,5,6.		217,37	0,1729	-500, 2500, 92	1

У початковій імітації було обрано рух по горизонталі. Процес моделювання виконувався із врахуванням дозволених маршрутів. Рух автодрона здійснювався тільки по дорозі, рух БПЛА тільки у дозволеній червоній зоні, рух робота тільки теж по дорозі. Аналіз даних таблиці 1 для перших трьох варіантів показав, що автодрон для таких умов знаходиться у не повній завантаженості, а робот не доцільно використовувати для перенесення по горизонталі, тому виграє БПЛА за

вартістю, але програє за загальним часом виконання робіт і надійністю, на яку впливають пориви вітру та дощ, що практично не можливо передбачати. Для моделювання перевезення за другою стратегією було обрано по горизонталі автодроном, по вертикалі на площадку БПЛА, а з площадки роботом. Така стратегія суттєво зменшила загальні витрати і незначно збільшила загальний час.

Таким чином, комбіноване застосування різних засобів переміщення і виконання замовлень і попереднім прорахунком способом імітаційного моделювання відкриває можливості застосування АСК використання БПЛА разом із другими видами безлюдних технологій. Якщо скористатись цими показниками, то за умов одиничної ймовірності виконання доставки визначимо ефективність 0,2 Дж/грн. Однак відсутність засобів просторового руху не дозволяє визначати ймовірність здійснення операції тип чи іншим способом. У зв'язку з цим виникає актуальна потреба будови моделі просторового руху дрону.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Обґрунтовано комплексну архітектуру АСК та розроблено на її основі функціональну схему АСК ТП із можливостями залучення і застосування власних та існуючих сервісів, що враховує досвід Амазон та пропонує залучати до складу сервісів із розвиненими послугами БПЛА, наземні електрокари і роботи вантажники.

2. Запропонований підхід, що представлено функціональними та блок-схемами разом із аналітичними методами для оцінки ефективності діяльності вузла побутового застосування операцій із залученням повітряних і наземних робототехнічних засобів для реалізації розширеного переліку послуг забезпечує будову математичної моделі АСК ТП побутових послуг.

3. Комплексне застосування пов'язаних мережею наземних та повітряних дронів розширює типи можливих послуг та суттєво підвищує їх ефективність і усуває частку правових протиріч із приватної власністю та її власниками, що у підсумку розширить впровадження безлюдних технологій у побуті за рахунок АСК.

РОЗДІЛ 3 РОЗВИТОК СТРУКТУРИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ АСК ТП ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БПЛА У ПОБУТІ

3.1 Постановка задачі про просторовий рух БПЛА

А Базова пів-зв'язана та зв'язані системи координат

Розвиток безлюдних технологій та результати досліджень і досвіду їх застосувань обґрунтовує застосування комплексної архітектури для будови АСК комплексного використання безлюдних технологій і мобільних робото-технічних систем. Узагальнені функціональні схеми АСК ТП із можливостями залучення і застосування власних та існуючих сервісів, що враховує досвід Амазон запропоновано в другому розділі роботи. Залучення до складу сервісів із розвиненими послугами БПЛА, наземні електрокари і роботи вантажники потребує забезпечення їх дій і взаємоузгоджених оптимальних рухів. У свою чергу реалізація таких вимог розв'язується тільки шляхом опису просторового руху для задач динаміки кожного із елементів, що рухаються при застосуванні безлюдних технологій. Далі для спрощення будемо розглядати ці елементи як абсолютно твердими. Введемо базову систему координат, що зв'язана із поверхнею землі. Представлено відповідно геоцентрична (3.1.1) та базова система координат (3.1.2).

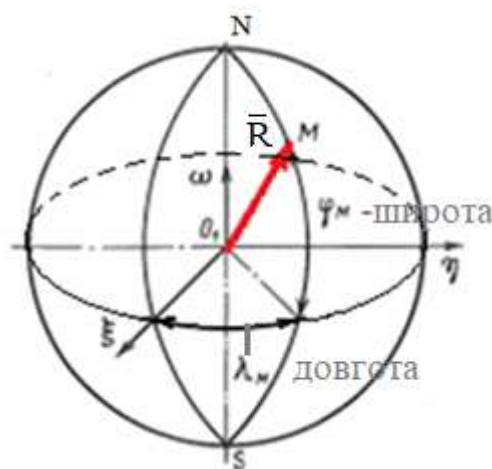


Рисунок 3.1.1 – Геоцентрична система координат

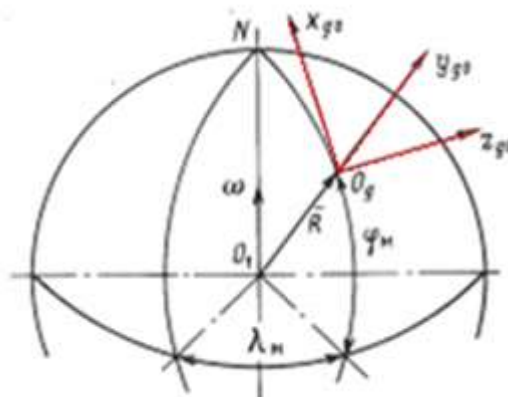


Рисунок 3.1.2 – Земна базова система координат

У зв'язку з тим, що оперативне керування рухом МРТС виконується у обмежених часових та малих просторових інтервалах у околі довільної точки криволінійної траєкторії маршруту, тому при аналізі та синтезі систем керування розглядатиме переміщення МРТС відносно нерухомої плоскої поверхні Землі та використовувати прямокутні Декартові системи координат.

Для постановки та розв'язку задач динаміки використовуються три системи координат.

Перша базова система координат $O_g X_{go} Y_{go} Z_{go}$ - орієнтована за основними напрямками на поверхні землі.

Друга проміжна система координат - $O X_g Y_g Z_g$ наполовину зв'язана, її начало завжди зв'язано з МРТС, а координатна вісь або паралельні вісі базової системи або постійно повернута на кут заданого курсу за прямолінійним відрізком траєкторії руху. Також на рис. 3.1.3 показано, що блок радіодіапазону підключається до мікроконтролеру через послідовний порт SPI. Цей тип порту є найшвидшим портом управління у типовому стандартному мікроконтролері або мікрокомп'ютері. Системи радіо керування (РК) призначені для забезпечення управління на основі двостороннього радіозв'язку. У більшості випадків РК промислових систем реалізується на невеликих відстанях (short range device (SRD)), або на відстанях прямої видимості.

Третя зв'язана система координат - $OXYZ$ і пів-зв'язана мають спільне начало, яке завжди зв'язано з МРТС, а її координатні вісі повертаються навколо нього з кутовою швидкістю Ω .

Для формування елементів моделі позначено систему керування, що встановлено на борту апарату як окремий блок 1 (рис. 2.2.3), а стаціонарно рухомий передавач як блок 2 (рис. 2.2.4). Також позначимо вхід першого блоку Вхід 1, а його вихід Вихід 2, який піде на вхід другого блоку. Таким чином по каналам зв'язку блоки пов'язано роз'єднувачами 1 та 2. На першому етапі позначимо та опишемо параметри, що буде подано на Вхід 1.

Необхідно подати координати відносно базової системи координат та кути орієнтації апарату у початковому положенні, що будемо подавати вхідним вектором \bar{Y}_1 :

$$\bar{Y}_1 = [X_1, Y_1, Z_1, \theta_1, \varphi_1, \psi_1]^T.$$

Також поставимо величину \bar{Y}_2 вектору положення і орієнтацію апарату у кінцевому положенні 2:

$$\bar{Y}_2 = [X_2, Y_2, Z_2, \theta_2, \varphi_2, \psi_2]^T.$$

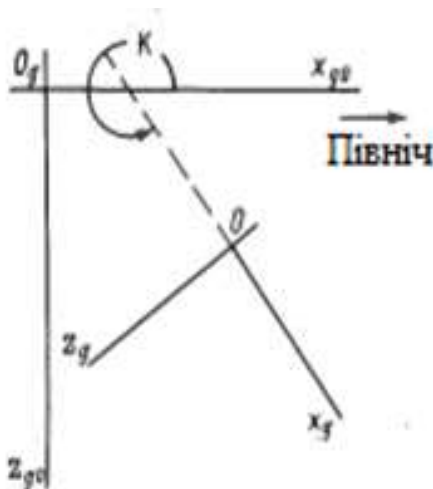


Рисунок 3.1.3 – Пів-зв'язана система координат

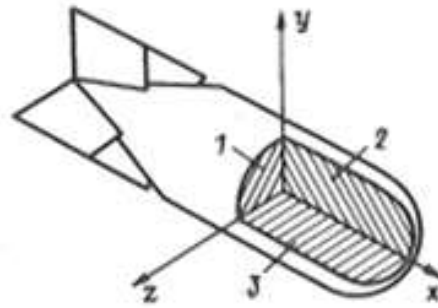


Рисунок 3.1.4 – Зв'язана система координат

1 – Площина шпангоута

2 – Діаметральна площина

3 – Площина палуби

Апарат, що рухається в базовій системі координат і його пів-зв'язані і зв'язана система координат подані на рис. 3.1.5.

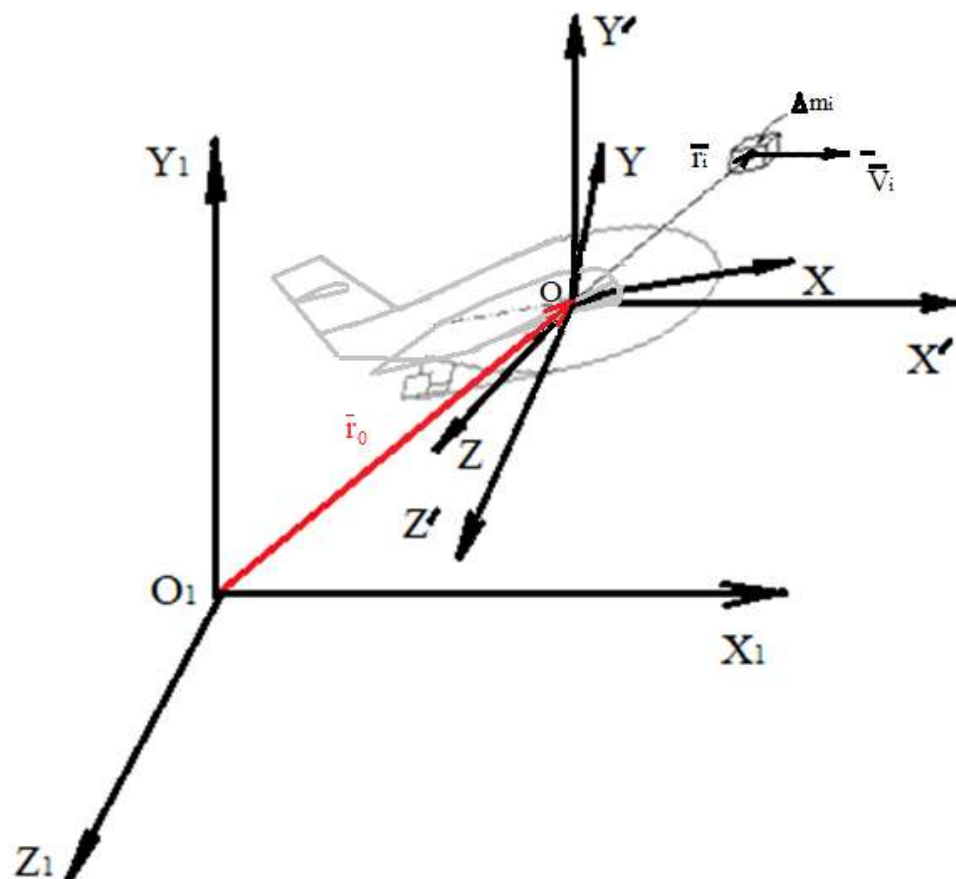


Рисунок 3.1.5 – Відображення апарату і систем координат у просторовому русі

Зв'язана система координат $OXYZ$ повертається на відповідні кути Ейлера $\theta_1, \varphi_1, \psi_1$ навколо точки O .

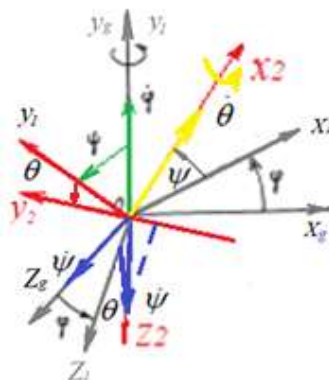


Рисунок 3.1.6 – Відображення поворотів систем координат у просторовому русі через повороти на кути Ейлера

Третя координатна система $OXYZ$ - використовується для побудови математичної моделі руху МРТС називається рухомою або зв'язаною.

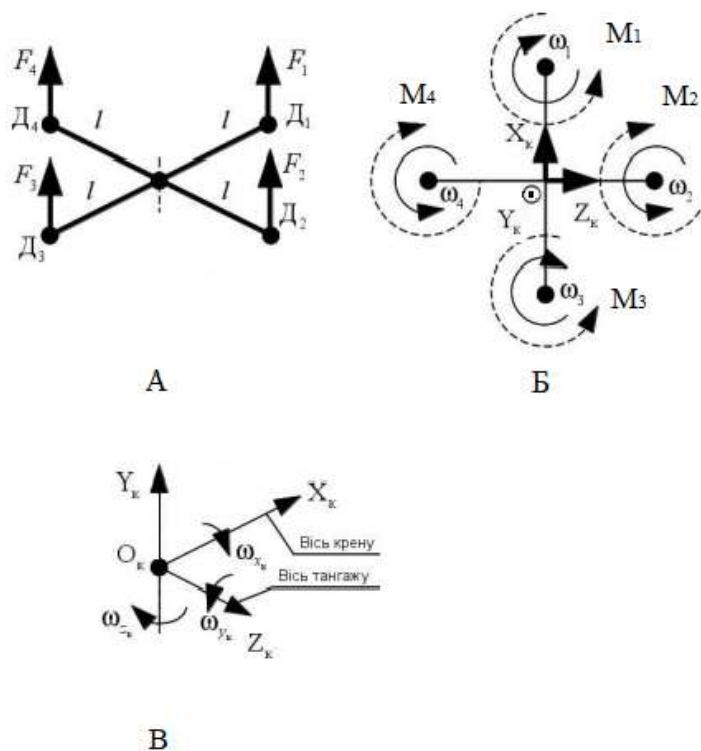


Рисунок 3.1.7 – Відображення схеми рами рушіїв БПЛА: А- векторів сил; Б-осей і моментів сил; В-осей і поворотів навколо них у просторовому русі через повороти на кути Ейлера θ, φ, ψ .

Опис просторового руху представляють як пошук залежності трьох кутів Ейлера як функцій часу. На сьогодні відомі три види позначення кутів Ейлера для опису руху абсолютно твердого тіла. Далі будимо використовувати таку трійку кутів Ейлера:

- кут рискання φ – кут між проекцією зв'язаної віссю Ox на горизонтальну площину та віссю Oxg ;
- кут диференту (тангаж) Ψ – кут між зв'язаною віссю Ox та горизонтальною площиною;
- кут крену θ - кут між поздовжньою площиною симетрії БПЛА (діаметральною площиною) та вертикальною площиною у якій міститься зв'язана вісь Ox .

Три послідовні повороти проти годинникової стрілки (рис.3.1.6) навколо вертикальної, поперечної та поздовжньої осей на кути φ, ψ, θ переводять зв'язану систему координат з початкового стану, коли вона суміщена з пів- зв'язаною через проміжні положення 1, 2 (при яких її осі позначено $x_1y_1z_1$ та $x_2y_2z_2$ відповідно) у деяке довільне положення 3. Останнє і визначає орієнтацію об'єкту у поточний момент часу. У зв'язку з цим ці три кути Ейлера і визначають кінематичні параметри руху МПО, МНО, ПО, що описують його стан з погляду орієнтації у просторі.

Б Зв'язок між кутовими та лінійними швидкостями

Розглянемо просторовий рух БПЛА. Припустимо, що конструкція апарату не деформується під впливом зовнішніх сил або ці деформації дуже малі, самі маси пристроїв апарату відносно його центру мас є нерухомими (рис. 3.1.5 - 3.1.7). Позначивши кути (рис. 3.1.6), спроектуємо похідні від кутів Ейлера за часом на нові положення після відповідних поворотів вісі X_2, Y_2 та Z_2 [29]:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} + \dot{\varphi} \sin \psi \\ \dot{\varphi} \cos \theta \cos \psi + \dot{\psi} \sin \theta \\ -\dot{\varphi} \sin \theta \cos \psi + \dot{\psi} \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1, \sin \psi, 0 \\ 0, \cos \theta \cos \psi, \sin \theta \\ 0, -\sin \theta \cos \psi, \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = B_\omega \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}. \quad (3.1.1)$$

Якщо ввести матрицю, що загалом прийнято називати матрицею обертального руху

$$B_\omega = \begin{bmatrix} 1, \sin \psi, 0 \\ 0, \cos \theta \cos \psi, \sin \theta \\ 0, -\sin \theta \cos \psi, \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (3.1.2)$$

тоді зв'язок між проекціями кутових швидкостей та кутами Ейлера у матричній формі представимо:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = B_\omega \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}.$$

Такий зв'язок дозволяє встановити кутову швидкість обертання БПЛА, якщо відомі кути Ейлера як функції часу. Нескладно встановити, помножуючи таке матричне рівняння (3.1.1) на обернену матрицю кутових швидкостей і представити компоненти вектору кутової швидкості через обернені матриці

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = B_\omega^{-1} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}. \quad (3.1.3)$$

Для подальшого використання одразу приведемо (3.1.3) до системи диференціальних рівнянь у компактній матричній формі:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \varphi \\ \psi \end{bmatrix} = B_\omega^{-1} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}. \quad (3.1.4)$$

Останні суттєво спрощуються для малих кутів ристання, крену та диференту (тангажу) та

мають вигляд:

$$B_{\omega} = \begin{bmatrix} 1, 0, 0 \\ 0, 1, 0 \\ 0, 0, 1 \end{bmatrix}.$$

Далі позначимо вектор швидкості початку зв'язаної і пів-зв'язаної системи координат V , а у базовій V_g . Швидкість руху центру мас МРО може бути подана через проєкції на вісі базової системи координат

$$V_g = [V_{xg}, V_{yg}, V_{zg}]^T,$$

які пов'язано з проєкціями вектору лінійної швидкості на зв'язані вісі

$$V = [V_x, V_y, V_z]^T.$$

Матричним рівнянням поступального руху [29]:

$$V = B_V V_g; \quad \text{або} \quad V_g = B_V^{-1} V,$$

де B_V та B_V^{-1} - пряма та зворотні кінематичні матриці.

Миттєві значення координат центру мас БПЛА відносно базової системи визначаються аналогічно диференціальним рівнянням (3.1.4)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = B_V^{-1} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}$$

3.2 Моделі зовнішніх сил та моменти сил, що діють на БПЛА

Усі зовнішні сили та моменти, що діють на корпус рухомого БПЛА можуть бути поділені на чотири категорії [29-32]:

- гідродинамічні сили, сили опору, моменти опору, обумовлені рухом БПЛА;
- сили гравітаційної взаємодії та Архімедові сили, що діють на структурні складові корпусу ПА або їх результуючі;

- керуючі сили і моменти, які утворюються засобами керування;
- сили та моменти, обумовлені хвильовими та ударними взаємодіями, течіями, хвилями і вибухами.

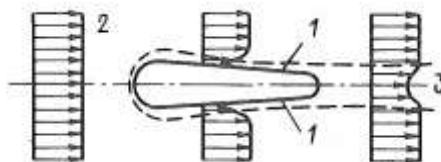


Рисунок 3.2.1 – Відображення схеми руху шарів повітря відносно поверхні елемента конструкції обтічної форми БПЛА, що демонструють причини утворення гідродинамічного опору

Для БПЛА типу квадрокоптерів, що мають велику густину форми і рухаються у повітрі силою Архімеда можна нехтувати. Проекції головного вектору, головного моменту гідродинамічних сил на вісі зв'язаної системи координат представимо трьох компонентними векторами:

$$\begin{bmatrix} R_x^T \\ R_y^T \\ R_z^T \end{bmatrix} = -0.5\rho v^2 S \begin{bmatrix} C_x & \frac{v_x}{|\vec{v}|} \\ C_y & \frac{v_y}{|\vec{v}|} \\ C_z & \frac{v_z}{|\vec{v}|} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_z^T \end{bmatrix} = -0.5\rho v^2 SL \begin{bmatrix} C_{mx} & \frac{\omega_x}{|\vec{\omega}|} \\ C_{my} & \frac{\omega_y}{|\vec{\omega}|} \\ C_{mz} & \frac{\omega_z}{|\vec{\omega}|} \end{bmatrix}, \quad (3.2.1)$$

- де v – швидкість потоку рідини, яка обтікає корпус ПА та яка відповідно до наших позначень дорівнює швидкості поступального руху початку зв'язаної системи координат; S, L - характерна площа і його лінійний розмір C_x, C_y, C_z – безрозмірні коефіцієнти гідродинамічних сил опору, C_{mx}, C_{my}, C_{mz} – безрозмірні коефіцієнти моментів крену, ристання і диференту, обумовлені впливом гідродинамічних опорів. Величини їх залежать від умов обтікання, кутів атаки α , дрейфу β и форми корпусу ПА. Їх визначають або за допомогою розрахункових методів, або шляхом модельних випробувань. Крім означених моментів виникають моменти опору, що діють на вал кожного із двигунів. Природа

їх виникнення однакова, тому для них справедливі вирази 3.2.1 однак коефіцієнти опору і параметри поверхонь мають різні залежності від швидкості і куту атаки вони визначаються експериментально [29]. У цих дослідженнях сили, що обумовлені хвильовими та ударними взаємодіями, течіями і вибухами теж будемо нехтувати в силу специфіки їх роботи.

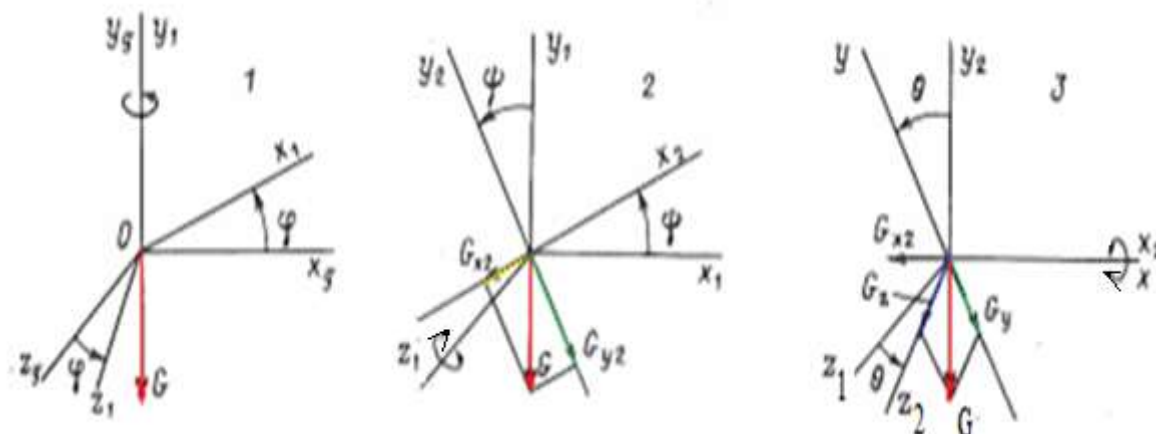


Рисунок 3.2.2 – Відображення проєкцій сили ваги БПЛА на вісі зв'язаної системи координат

Сили гравітаційної взаємодії вносять суттєвий вклад до головного вектору сил. Вони представляються у вигляді:

$$\begin{bmatrix} F_x^g \\ F_y^g \\ F_z^g \end{bmatrix} = -gm \begin{bmatrix} \sin \psi \\ \cos \psi \cos \theta \\ -\cos \psi \sin \theta \end{bmatrix}. \quad (3.2.2)$$

Сили тяги кожного із рушіїв та їх моменти сил визначає кутова швидкість гвинтів для даного дослідження обмежимося наступними моделями:

$$\bar{F}_i = C_f \rho S n_i^2 r_i^2; \quad \bar{M} = \sum_{i=1}^N \bar{r}_i \times \bar{F}_i \quad (3.2.3)$$

Таким чином, визначено сили і моменти сил, що діють на БПЛА під час руху, якщо відомі експериментальні характеристики та геометричні самого гвинта.

3.3 Моделі руху у базовій системі координат та їх спрощення.

А Загальна модель руху у базовій системі координат

В останні десятиріччя опубліковано роботи [29, 31- 37], у яких розглядалися різні аспекти формування математичних моделей, розрахунку окремих характеристик та проектування, але тим не менш проблема опису руху, лишається не доведеною до інженерної методики розрахунку. Особливо вона актуальна для робочих імітаційного моделювання БПЛА, що змінює свою форму. Поставимо за мету підрозділу спростити рівняння руху БПЛА. Обравши центр мас за точку O , що знаходиться у корпусі та жорстко з ним зв'язана (рис.3.1.5), почнемо відлік системи координат з $Oxyz$. Покладемо, що ПА є абсолютно тверде тіло, а начало координат O рухається поступально із швидкістю \bar{v}_o та обертається із кутовою швидкістю $\bar{\Omega}$ [31-33]. Розглянемо довільну точку i , положення якої задано радіус вектором \bar{r}_{oi} відносно зв'язаної системи координат та виокремимо у її околі елемент масою Δm_i , що рухається із швидкістю \bar{v}_i відносно базової системи координат. Безумовно, точка i може знаходитись як у тілі самого БПЛА так і у рідині, що знаходиться у отворах та у середині його легкого корпусу так і зовні у безмежній рідині, що оточує легкий корпус. Розглянемо інерційну Декартову систему координат $Ox_1y_1z_1$, в якій рухається БПЛА, позначимо радіус вектор \bar{r}_o , що визначає в ній положення початку відліку зв'язаної системи координат $Oxyz$. Відповідно до означеної постановки запишемо вектори $\bar{K}_1, \bar{L}_1, \bar{M}_1$ та $\bar{K}, \bar{L}, \bar{M}$ імпульсу та моменти імпульсу і сил у базовій та зв'язаній системах координат відповідно рівняння руху:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{K}_1}{dt} = \bar{R}_1, \\ \frac{d\bar{L}_1}{dt} = \bar{M}_1, \end{cases} \quad (3.3.1)$$

де \bar{K}_1, \bar{L}_1 – відповідно головні вектори імпульсу та моменту імпульсу у інерційній системі координат. Для зв'язаної системи координат $OXYZ$, рівняння (рис. 3.1.5) перетворимо з урахуванням співвідношень (3.3.1) і властивостей модуля радіус вектору \bar{r}_{oi} та вектору кутової швидкості довільної точки i , яка для абсолютно твердого тіла є величиною за своїм положенням незмінною, тоді векторний добуток вектору швидкості на той же вектор швидкості дорівнює нулю, а також приріст будь якого вектору у рухомій системі координат визначається крім зміни початку відліку, ще й векторним добутком вектору кутової швидкості на сам вектор та інтервал часу:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{K}}{dt} + \bar{\Omega} \times \bar{K} = \bar{R}; \\ \frac{d\bar{L}}{dt} + \bar{\Omega} \times \bar{L} + \bar{v}_o \times \bar{K} = \bar{M}. \end{cases} \quad (3.3.2)$$

Враховуючи наведене, перетворимо рівняння руху до скалярної системи рівнянь :

$$\begin{aligned} \frac{dK_x}{dt} + \omega_y K_z - \omega_z K_y &= R_x; \\ \frac{dK_y}{dt} + \omega_z K_x - \omega_x K_z &= R_y; \\ \frac{dK_z}{dt} + \omega_x K_y - \omega_y K_x &= R_z; \end{aligned} \quad (3.3.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dL_x}{dt} + \omega_y L_z - \omega_z L_y + v_y K_z - v_z K_y &= M_x; \\ \frac{dL_y}{dt} + \omega_z L_x - \omega_x L_z + v_z K_x - v_x K_z &= M_y; \end{aligned} \quad (3.3.4)$$

$$\frac{dL_z}{dt} + \omega_x L_y - \omega_y L_x + v_x K_y - v_y K_x = M_z$$

У цій системі шість скалярних рівнянь. Перші три рівняння (3.3.3)

описують поступальний рух дрону. Другі три (3.3.4) описують його обертальний рух. Для подальшого спрощення рівнянь руху скористаємось поданням проекції імпульсу, моменту імпульсу через кінетичну енергію W [31]:

$$\begin{aligned} K_x &= \frac{\partial W}{\partial v_x}; K_y = \frac{\partial W}{\partial v_y}; K_z = \frac{\partial W}{\partial v_z}; \\ L_x &= \frac{\partial W}{\partial \omega_x}; L_y = \frac{\partial W}{\partial \omega_y}; L_z = \frac{\partial W}{\partial \omega_z}. \end{aligned} \quad (3.3.5)$$

Ці співвідношення є наслідком фундаментальних визначень понять імпульсу, моменту імпульсу, кінетичної енергії приводяться до системи диференціальних рівнянь простим диференціюванням виразів кінетичної енергії за відповідними проекціями векторів швидкостей. Такий підхід до утворення рівнянь руху ПА, як це продемонстровано у [29, 31- 37]:

- по - перше подає ПА як цілісну енергетичну систему, що складається із ПА і рідини, що рухається як ззовні так і у середині нього;

- по - друге дозволяє подати залежності проекцій векторів імпульсу та його моменту від складових вектору кутової та лінійної швидкостей у явному вигляді.

У зв'язку з цим визначення кінетичної енергії подається як сума кінетичної енергії ПА - W_A та кінетичної енергії нескінченної рідини - W_B :

$$W = W_A + W_B. \quad (3.3.6)$$

Кінетична енергія ПА, за умов незмінності маси дрону та її розподілу по апарату [29, 31- 37] представиться через компоненти вектору швидкості - поступальну та кутову:

$$\begin{aligned} W_A &= \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) + mv_x(\omega_y z - \omega_z y) + mv_y(\omega_z x - \omega_x z) + mv_z(\omega_x y - \omega_y x) + \frac{1}{2}J_{xx}\omega_x^2 \\ &+ \frac{1}{2}J_{yy}\omega_y^2 + \frac{1}{2}J_{zz}\omega_z^2 - J_{xy}\omega_x\omega_y - J_{xz}\omega_x\omega_z - J_{yz}\omega_y\omega_z \end{aligned} \quad ,(3.3.7)$$

де m – маса ПА, x_c, y_c, z_c – координати його центру мас у зв'язаній системі координат, J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} – моменти інерції та J_{xy}, J_{xz}, J_{yz} – відцентрові моменти інерції, що визначаються відповідно за аналогією:

$$J_{xx} = \int_m (y^2 + z^2) dm; \quad J_{xz} = \int_m yz dm$$

Матриця інерції

Вираз (2.3.1.10) подамо у матричній формі:

$$W_A = 0.5[v^T \Omega^T] I \begin{bmatrix} v \\ \Omega \end{bmatrix}, \quad (3.3.8)$$

де тут та далі умовно позначено матрицю рядок із шістьма елементами $[v^T \Omega^T]$. Перші три елементи матриці рядка співпадають з відповідними елементами матриці рядка, отриманого транспонуванням вектору лінійних швидкостей дрону $\bar{v}^T = [v_x v_y v_z]$, а останні три співпадають з елементами матриці рядка, яка утворена транспонуванням його вектору кутових швидкостей обертання навколо точки O $\bar{\Omega}^T = [\omega_x \omega_y \omega_z]$, а I – матриця інерції ПА як абсолютно твердого тіла:

$$I = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & m z_c & -m y_c \\ 0 & m & 0 & -m z_c & 0 & m x_c \\ 0 & 0 & m & m y_c & -m x_c & 0 \\ 0 & -m z_c & m y_c & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ m z_c & 0 & -m x_c & -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -m y_c & m x_c & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.3.9)$$

У випадку коли початок зв'язаної системи координат суміщено із центром мас БПЛА, тоді його координати у ній мають значення $x_c = y_c = z_c = 0$, а відцентрові моменти $J_{xy} = J_{xz} = J_{yz} = 0$. За цих умов вирази кінетичної енергії будуть суттєво спрощені, а матриця інерції перетвориться на діагональну. Кінетична енергія рідини у загальному випадку складається із кінетичної енергії рідини, яка обтікає корпус ПА та протікає крізь отвори у легкому корпусі і внутрішні порожнини.

Виділимо нескінченно малий об'єм рідини dV , у межах якого зміною вектору швидкості v' і густини можливо знехтувати, тоді для кінетичної енергії запишемо:

$$dW_B = 0.5 \rho v'^2 dV. \quad (3.3.10)$$

Введемо середню по об'єму апарату густину:

$$\rho_A = \frac{m_A}{V}.$$

Порівняння її величини з густиною повітря дає підстави для нехтування цим доданком у рівнянні (3.3.6).

Б. Спрощена модель руху у базовій системі координат

Подамо вираз кінетичної енергії з урахуванням припущення про квазінезмінність форми та розподіл мас. За допомогою матриці інерції, що тепер спрощено з урахуванням порівняння середньої густини апарату та повітря, запишемо кінетичну енергію системи за (3.3.7) дрону, який рухається у повітрі з урахуванням статичних моментів інерції:

$$\begin{aligned} W = & 0.5(a_{11}v_x^2 + a_{22}v_y^2 + a_{33}v_z^2 + a_{44}\omega_x^2 + a_{55}\omega_y^2 + a_{66}\omega_z^2) + \\ & + 0.5 \left[v_x (a_{15}\omega_y + a_{16}\omega_z) + v_y (a_{24}\omega_x + a_{26}\omega_z) + v_z (a_{34}\omega_x + a_{35}\omega_y) \right] + \\ & + 0.5 \left[\omega_x (a_{42}v_y + a_{43}v_z + a_{45}\omega_y + a_{46}\omega_z) + \omega_y (a_{51}v_x + a_{53}v_z + a_{54}\omega_x + a_{56}\omega_z) + \right. \\ & \left. + \omega_z (a_{61}v_x + a_{62}v_y + a_{64}\omega_x + a_{65}\omega_y) \right] \end{aligned} \quad (3.3.11)$$

Далі після диференціювання виразу кінетичної енергії отримаємо вирази проєкцій імпульсу та моментів імпульсу:

$$\begin{aligned} K_x &= a_{11}v_x + 0.5 \left[(a_{15} + a_{51})\omega_y + (a_{16} + a_{61})\omega_z \right]; \\ K_y &= a_{22}v_y + 0.5 \left[(a_{24} + a_{42})\omega_x + (a_{26} + a_{62})\omega_z \right]; \\ K_z &= a_{33}v_z + 0.5 \left[(a_{34} + a_{43})\omega_x + (a_{35} + a_{53})\omega_y \right]; \end{aligned} \quad (3.3.12)$$

$$L_x = a_{44}\omega_x + 0.5[(a_{24} + a_{42})v_y + (a_{34} + a_{43})v_z + (a_{45} + a_{54})\omega_y + (a_{46} + a_{64})\omega_z];$$

$$L_y = a_{55}\omega_y + 0.5[(a_{15} + a_{51})v_x + (a_{35} + a_{53})v_z + (a_{45} + a_{54})\omega_x + (a_{56} + a_{65})\omega_z];$$

$$L_z = a_{66}\omega_z + 0.5[(a_{16} + a_{61})v_x + (a_{26} + a_{62})v_y + (a_{46} + a_{64})\omega_x + (a_{56} + a_{65})\omega_y];$$

а за рівняннями (3.3.3)- (3.3.4) запишемо систему:

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{1}{a_{11}}\{R_x - G_{rx}(t)\};$$

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{1}{a_{22}}\{R_y - G_{ry}(t)\};$$

$$\frac{dv_z}{dt} = \frac{1}{a_{33}}\{R_z - G_{rz}(t)\};$$

$$\frac{d\omega_x}{dt} = \frac{1}{a_{44}}\{M_x - G_{mx}(t)\};$$

(3.3.13)

$$\frac{d\omega_y}{dt} = \frac{1}{a_{55}}\{M_y - G_{my}(t)\};$$

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \frac{1}{a_{66}}\{M_z - G_{mz}(t)\}.$$

Для спрощення форми запису у рівняннях системи (3.3.13) позначено функції:

$$G_{rx}(t) = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} [(a_{15} + a_{51})\omega_y + (a_{16} + a_{61})\omega_z] + \omega_y \left\{ a_{33}v_z + \frac{1}{2} [(a_{34} + a_{43})\omega_x + (a_{35} + a_{53})\omega_y] \right\} - \omega_z \left\{ a_{22}v_y + 0.5 [(a_{24} + a_{42})\omega_x + (a_{26} + a_{62})\omega_z] \right\};$$

$$G_{ry}(t) = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} [(a_{24} + a_{42})\omega_x + (a_{26} + a_{62})\omega_z] + \omega_z \left\{ a_{11}v_x + \frac{1}{2} [(a_{15} + a_{51})\omega_y + (a_{16} + a_{61})\omega_z] \right\} - \omega_x \left\{ a_{33}v_z + 0.5 [(a_{34} + a_{43})\omega_x + (a_{35} + a_{53})\omega_y] \right\};$$

$$G_{rz}(t) = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} [(a_{34} + a_{43})\omega_x + (a_{35} + a_{53})\omega_y] + \omega_x \left\{ a_{22}v_y + \frac{1}{2} [(a_{24} + a_{42})\omega_x + (a_{26} + a_{62})\omega_z] \right\} - \omega_y \left\{ a_{11}v_x + 0.5 [(a_{15} + a_{51})\omega_y + (a_{16} + a_{61})\omega_z] \right\};$$

$$\begin{aligned}
G_{mx}(t) &= \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left[(a_{24} + a_{42})v_y + (a_{34} + a_{43})v_z + (a_{45} + a_{54})\omega_y + (a_{46} + a_{64})\omega_z \right] + \\ &+ \omega_y \left[a_{66}\omega_z + \frac{1}{2} \left[(a_{16} + a_{61})v_x + (a_{26} + a_{62})v_y + (a_{46} + a_{64})\omega_x + (a_{56} + a_{65})\omega_y \right] \right] - \\ &- \omega_z \left[a_{55}\omega_y + \frac{1}{2} \left[(a_{15} + a_{51})v_x + (a_{35} + a_{53})v_z + (a_{45} + a_{54})\omega_x + (a_{56} + a_{65})\omega_z \right] \right] + \\ &+ v_y \left[a_{33}v_z + \frac{1}{2} \left[(a_{34} + a_{43})\omega_x + (a_{35} + a_{53})\omega_y \right] \right] - v_z \left[a_{22}v_y + \frac{1}{2} \left[(a_{24} + a_{42})\omega_x + (a_{26} + a_{62})\omega_z \right] \right] \end{aligned} \right\} \\
G_{my}(t) &= \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left[(a_{15} + a_{51})v_x + (a_{35} + a_{53})v_z + (a_{45} + a_{54})\omega_x + (a_{56} + a_{65})\omega_z \right] + \\ &\omega_z \left[a_{44}\omega_x + \frac{1}{2} \left[(a_{24} + a_{42})v_y + (a_{34} + a_{43})v_z + (a_{45} + a_{54})\omega_y + (a_{46} + a_{64})\omega_z \right] \right] - \\ &- \omega_x \left[a_{66}\omega_z + \frac{1}{2} \left[(a_{16} + a_{61})v_x + (a_{26} + a_{62})v_y + (a_{46} + a_{64})\omega_x + (a_{56} + a_{65})\omega_y \right] \right] + \\ &+ v_z \left[a_{11}v_x + \frac{1}{2} \left[(a_{15} + a_{51})\omega_y + (a_{16} + a_{61})\omega_z \right] \right] - v_x \left[a_{33}v_z + \frac{1}{2} \left[(a_{34} + a_{43})\omega_x + (a_{35} + a_{53})\omega_y \right] \right] \end{aligned} \right\} \\
G_{mz}(t) &= \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left[(a_{16} + a_{61})v_x + (a_{26} + a_{62})v_y + (a_{46} + a_{64})\omega_x + (a_{56} + a_{65})\omega_y \right] + \\ &\omega_x \left[a_{55}\omega_y + \frac{1}{2} \left[(a_{15} + a_{51})v_x + (a_{35} + a_{53})v_z + (a_{45} + a_{54})\omega_x + (a_{56} + a_{65})\omega_z \right] \right] - \\ &- \omega_y \left[a_{44}\omega_x + \frac{1}{2} \left[(a_{24} + a_{42})v_y + (a_{34} + a_{43})v_z + (a_{45} + a_{54})\omega_y + (a_{46} + a_{64})\omega_z \right] \right] + \\ &+ v_x \left[a_{22}v_y + \frac{1}{2} \left[(a_{24} + a_{42})\omega_x + (a_{26} + a_{62})\omega_z \right] \right] - v_y \left[a_{11}v_x + \frac{1}{2} \left[(a_{15} + a_{51})\omega_y + (a_{16} + a_{61})\omega_z \right] \right] \end{aligned} \right\}
\end{aligned}
\tag{3.3.14}$$

Отримана система рівнянь (3.3.13) є нелінійною, оскільки проекції головного вектору зовнішніх сил містять сили тертя, які пропорційні квадрату проекцій векторів лінійних та кутових швидкостей.

В. Спрощення розв'язку системи, за методом рекурентної апроксимації

У розкладі сил застосовано похідну по компонентам вектору швидкості, що обчислюється якщо відомі швидкості, які дозволяють після диференціювання нелінійних доданків записати їх похідні [33]:

$$\frac{\partial R_x}{\partial v_x} = -\frac{1}{2} \rho S C_{xv} \left(\frac{v_x^2}{v^2} + 1 \right), \quad \frac{\partial R_y}{\partial v_y} = -\frac{1}{2} \rho S C_{yv} \left(\frac{v_y^2}{v^2} + 1 \right), \quad \frac{\partial R_z}{\partial v_z} = -\frac{1}{2} \rho S C_{zv} \left(\frac{v_z^2}{v^2} + 1 \right).$$

Тоді діючи за аналогією з кроками роботи [33] застосуємо метод рекурентної апроксимації і представимо розв'язок рівнянь поступального та обертального руху та отримаємо перше наближення для функцій часу кінематичних параметрів. Задамо нульові наближення та помножимо на відповідний інтегруючий множник представимо за [33] розв'язок кожного із рівнянь системи у вигляді:

$$\begin{aligned}
 v_{x,n+1} &= \exp \left(\frac{1}{a_{11\ 0}} \int_0^t \frac{\partial R_x}{\partial v_x} \Big|_{v_x=v_{xn}} ds \right) \\
 &\left\langle v_{x0} + \frac{1}{a_{11\ 0}} \int_0^t \left[R_{xn} - G_{rxn}(t) - v_{x,n} \frac{\partial R_x}{\partial v_x} \Big|_{v_x=v_{xn}} \right] \exp \left(-\frac{1}{a_{11\ 0}} \int_0^s \frac{\partial R_x}{\partial v_x} \Big|_{v_x=v_{xn}} dr \right) ds \right\rangle ; \\
 v_{y,n+1} &= \exp \left(\frac{1}{a_{22\ 0}} \int_0^t \frac{\partial R_y}{\partial v_y} \Big|_{v_y=v_{yn}} ds \right) \\
 &\left\langle v_{y0} + \frac{1}{a_{22\ 0}} \int_0^t \left[R_{yn} - G_{ryn}(t) - v_{y,n} \frac{\partial R_y}{\partial v_y} \Big|_{v_y=v_{yn}} \right] \exp \left(-\frac{1}{a_{22\ 0}} \int_0^s \frac{\partial R_y}{\partial v_y} \Big|_{v_y=v_{yn}} dr \right) ds \right\rangle ; \\
 v_{z,n+1} &= \exp \left(\frac{1}{a_{33\ 0}} \int_0^t \frac{\partial R_z}{\partial v_z} \Big|_{v_z=v_{zn}} ds \right) \\
 &\left\langle v_{z0} + \frac{1}{a_{33\ 0}} \int_0^t \left[R_{zn} - G_{rzn}(t) - v_{z,n} \frac{\partial R_z}{\partial v_z} \Big|_{v_z=v_{zn}} \right] \exp \left(-\frac{1}{a_{33\ 0}} \int_0^s \frac{\partial R_z}{\partial v_z} \Big|_{v_z=v_{zn}} dr \right) ds \right\rangle ; \\
 \omega_{x,n+1} &= \exp \left(\frac{1}{a_{44\ 0}} \int_0^s \frac{\partial M_x}{\partial \omega_x} \Big|_{\omega_x=\omega_{xn}} dr \right) \\
 &\left\langle \omega_{x0} + \frac{1}{a_{44\ 0}} \int_0^t \left[M_{xn} - G_{mxn}(t) - v_{x,n} \frac{\partial M_x}{\partial \omega_x} \Big|_{\omega_x=\omega_{xn}} \right] \exp \left(-\frac{1}{a_{44\ 0}} \int_0^s \frac{\partial M_x}{\partial \omega_x} \Big|_{\omega_x=\omega_{xn}} dr \right) ds \right\rangle ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega_{y,n+1} &= \exp \left(\frac{1}{a_{55\ 0}} \int_0^t \frac{\partial M_y}{\partial \omega_y} \Big|_{\omega_y = \omega_{yn}} ds \right) \\
 &\left\langle \omega_{y0} + \frac{1}{a_{55\ 0}} \int_0^t \left[M_{yn} - G_{myn}(t) - \omega_{y,n} \frac{\partial M_y}{\partial \omega_y} \Big|_{\omega_y = \omega_{yn}} \right] \exp \left(-\frac{1}{a_{55\ 0}} \int_0^s \frac{\partial M_y}{\partial \omega_y} \Big|_{\omega_y = \omega_{yn}} dr \right) ds \right\rangle ; \\
 \omega_{z,n+1} &= \exp \left(\frac{1}{a_{66\ 0}} \int_0^t \frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} \Big|_{\omega_z = \omega_{zn}} ds \right) \\
 &\left\langle \omega_{z0} + \frac{1}{a_{66\ 0}} \int_0^t \left[M_{zn} - G_{mzn}(t) - \omega_{z,n} \frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} \Big|_{\omega_z = \omega_{zn}} \right] \exp \left(-\frac{1}{a_{66\ 0}} \int_0^s \frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} \Big|_{\omega_z = \omega_{zn}} dr \right) ds \right\rangle .(3.3.15)
 \end{aligned}$$

Позначимо числом у нижньому індексі номер наближення компоненти, що визначено у відповідному наближенні швидкості, тоді для першого наближення запишемо:

$$\begin{aligned}
 v_{x1} &= v_{x0} + \frac{1}{a_{11\ 0}} \int_0^t [R_{x0}(\tau) - G_{rx0}(\tau)] d\tau ; v_{y1} = v_{y0} + \frac{1}{a_{22\ 0}} \int_0^t [R_{y0}(\tau) - G_{ry0}(\tau)] d\tau ; \\
 v_{z1} &= v_{z0} + \frac{1}{a_{33\ 0}} \int_0^t [R_{z0}(\tau) - G_{zr0}(\tau)] d\tau ; v_1 = \sqrt{v_{x1}^2 + v_{y1}^2 + v_{z1}^2} ; \\
 \omega_{x1} &= \omega_{x0} + \frac{1}{a_{44\ 0}} \int_0^t [M_{x0}(\tau) - G_{mx0}(\tau)] d\tau ; \omega_{y1} = \omega_{y0} + \frac{1}{a_{55\ 0}} \int_0^t [M_{y0}(\tau) - G_{my0}(\tau)] d\tau ; \\
 \omega_{z1} &= \omega_{z0} + \frac{1}{a_{66\ 0}} \int_0^t [M_{z0}(\tau) - G_{mz0}(\tau)] d\tau ; \omega_1 = \sqrt{\omega_{x1}^2 + \omega_{y1}^2 + \omega_{z1}^2} ; \quad (3.3.16)
 \end{aligned}$$

Отримані вирази лінійних та кутових швидкостей подані у зв'язаній системі координат. Як продемонстровано у роботах [31-37], виходячи з послідовного обертання за напрямками крену, курсу, диференту вектор кутових швидкостей у зв'язаній системі координат та інерційній є добутком кінематичної матриці обертального руху та матриці стовпця, елементи якого дорівнюють компонентам вектору кутової швидкості у інерційній або базовій системі координат:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} + \dot{\phi} \sin \psi \\ \dot{\phi} \cos \theta \cos \psi + \dot{\psi} \sin \theta \\ -\dot{\phi} \sin \theta \cos \psi + \dot{\psi} \cos \theta \end{bmatrix} = B_\omega \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix},$$

де позначено відповідно до [33] кінематичну матрицю обертального руху яку пропонуємо спростити, оскільки для задач визначення ефективності приймемо кути тангажу та крену прийняти нульовими, тоді за (3.1.2) запишемо

$$B_\omega = \begin{bmatrix} 1, \sin \psi, 0 \\ 0, \cos \psi \cos \theta, \sin \theta \\ 0, -\cos \psi \sin \theta, \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1, 0, 0 \\ 0, 1, 0 \\ 0, 0, 1 \end{bmatrix}.$$

Нескладно переконатись, що її обернена матриця після спрощення для нульових кутів дорівнює:

$$B_\omega^{-1} = \begin{bmatrix} 1, -\sin \psi, \sin \theta \operatorname{tg} \psi \\ 0, 1, -\frac{\sin \theta}{\cos \psi} \\ 0, \sin \theta, \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1, 0, 0 \\ 0, 1, 0 \\ 0, 0, 1 \end{bmatrix}.$$

Останнє дозволить після представлення системи проєкцій кутових швидкостей відносно похідних кутів Ейлера також знайти її обернену B_ω^{-1} . Перехід до інерційної системи координат здійснимо за допомогою оберненої кінематичної матриці обертального руху за співвідношеннями:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = B_\omega^{-1} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \text{ або у інтегральній формі } \begin{bmatrix} \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} = \int_0^t B_\omega^{-1} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} d\tau,$$

За умов першого наближення для компонент вектору кутової швидкості, кути крену, курсу, диференту у першому наближенні (позначено нижнім індексом 1) подамо через інтеграли:

$$\theta_1 = \theta_0 + \int_0^t [\omega_{x1} - \omega_{y1} \sin \psi + \omega_{z1} \sin \theta \operatorname{tg} \psi] d\tau; \phi_1 = \phi_0 + \int_0^t \left[\omega_{y1} - \frac{\omega_{z1} \sin \theta}{\cos \psi} \right] d\tau; \psi_1 = \psi_0 + \int_0^t [\omega_{y1} \sin \theta + \omega_{z1} \cos \theta] d\tau.$$

Координати точки у інерційній системі координат визначаються, як показано у роботах [31- 37], через її компоненти вектору швидкості у зв'язаній системі координат за допомогою оберненої кінематичної матриці поступального руху:

$$B_v^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi, (\sin \varphi \sin \theta - \cos \varphi \sin \psi \cos \theta), (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \sin \varphi \cos \theta) \\ \sin \psi, \cos \psi \cos \theta, -\cos \psi \sin \theta \\ -\sin \varphi \cos \psi, (\sin \varphi \sin \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta), (\cos \varphi \cos \theta - \sin \varphi \sin \psi \sin \theta) \end{bmatrix} \quad (3.3.17)$$

наступним чином

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = B_v^{-1} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \text{ або у інтегральній формі } \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = \int_0^t B_v^{-1} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} d\tau.$$

За умов першого наближення для компонент вектору лінійної швидкості, кута крену, курсу, диференту у першому наближенні (позначено нижнім індексом 1) подамо через інтеграли:

$$\begin{bmatrix} x_{g1} \\ y_{g1} \\ z_{g1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{g0} \\ y_{g0} \\ z_{g0} \end{bmatrix} + \int_0^t \left\{ \begin{bmatrix} v_{x1} \cos \varphi_1 \cos \psi_1 + v_{y1} (\sin \varphi_1 \sin \theta_1 - \cos \varphi_1 \sin \psi_1 \cos \theta_1) + v_{z1} (\cos \varphi_1 \sin \psi_1 \sin \theta_1 + \sin \varphi_1 \cos \theta_1) \\ v_{x1} \sin \psi_1 + v_{y1} \cos \psi_1 \cos \theta_1 - v_{z1} \cos \psi_1 \sin \theta_1 \\ -v_{x1} \sin \varphi_1 \cos \psi_1 + v_{y1} (\sin \varphi_1 \sin \psi_1 \cos \theta_1 + \cos \varphi_1 \sin \theta_1) + v_{z1} (\cos \varphi_1 \cos \theta_1 - \sin \varphi_1 \sin \psi_1 \sin \theta_1) \end{bmatrix} \right\} d\tau$$

Друге наближення отримаємо з урахуванням першого и так далі за рекурентним алгоритмом

$$v_{x,2} = \exp \left(-\frac{\rho S C_x}{2a_{11}} \int_0^t v_1 \left(\frac{v_{x1}^2}{v_1^2} + 1 \right) dq \right) \left\langle v_{x0} + \frac{1}{a_{11}} \int_0^t \left[R_{x1} - G_{rx1}(q) + v_{x,1} \frac{\rho S C_x}{2} v_1 \left(\frac{v_{x1}^2}{v_1^2} + 1 \right) \right] \exp \left(\frac{\rho S C_x}{2a_{11}} \int_0^q v_1 \left(\frac{v_{x1}^2}{v_1^2} + 1 \right) dr \right) dq \right\rangle$$

$$v_{y,2} = \exp \left(-\frac{\rho S C_y}{2a_{22}} \int_0^t v_1 \left(\frac{v_{y1}^2}{v_1^2} + 1 \right) dq \right) \left\langle v_{y0} + \frac{1}{a_{22}} \int_0^t \left[R_{y1} - G_{ry1}(q) + v_{y,1} \frac{\rho S C_y}{2} v_1 \left(\frac{v_{y1}^2}{v_1^2} + 1 \right) \right] \exp \left(\frac{\rho S C_y}{2a_{22}} \int_0^q v_1 \left(\frac{v_{y1}^2}{v_1^2} + 1 \right) dr \right) dq \right\rangle$$

$$\begin{aligned}
 v_{z,2} &= \exp\left(\frac{\rho S C_z}{2a_{33}} \int_0^t v_1 \left(\frac{v_{z1}^2}{v_1^2} + 1\right) dq\right) \\
 &\left\langle v_{z0} + \frac{1}{a_{33}} \int_0^t \left[R_{z1} - G_{rz1}(q) - v_{z,1} \frac{\rho S C_z}{2} v_1 \left(\frac{v_{z1}^2}{v_1^2} + 1\right) \right] \exp\left(-\frac{\rho S C_z}{2a_{33}} \int_0^s v_1 \left(\frac{v_{z1}^2}{v_1^2} + 1\right) dr\right) \right\} dq \Bigg\rangle \\
 \omega_{x,2} &= \exp\left(\frac{\rho S L C_{mx}}{2a_{44}\omega_1} \int_0^t v_1^2(q) dq\right) \\
 &\left\langle \omega_{x0} + \frac{1}{a_{44}} \int_0^t \left[M_{x1} - G_{mx1}(q) - v_{x,1} \frac{\rho S L C_{mx}}{2a_{44}\omega_1} v_1^2(q) \right] \exp\left(-\frac{\rho S L C_{mx}}{2a_{44}\omega_1} \int_0^q v_1^2(r) dr\right) \right\} dq \Bigg\rangle ; \\
 \omega_{y,2} &= \exp\left(\frac{\rho S L C_{my}}{2a_{55}\omega_1} \int_0^t v_1^2(q) dq\right) \\
 &\left\langle \omega_{y0} + \frac{1}{a_{44}} \int_0^t \left[M_{y1} - G_{my1}(q) - v_{y,1} \frac{\rho S L C_{my}}{2a_{55}\omega_1} v_1^2(q) \right] \exp\left(-\frac{\rho S L C_{my}}{2a_{55}\omega_1} \int_0^q v_1^2(r) dr\right) \right\} dq \Bigg\rangle ; \\
 \omega_{z,2} &= \exp\left(\frac{\rho S L C_{mz}}{2a_{66}\omega_1} \int_0^t v_1^2(q) dq\right) \\
 &\left\langle \omega_{z0} + \frac{1}{a_{66}} \int_0^t \left[M_{z1} - G_{mz1}(q) - v_{z,1} \frac{\rho S L C_{mz}}{2a_{66}\omega_1} v_1^2(q) \right] \exp\left(-\frac{\rho S L C_{mz}}{2a_{66}\omega_1} \int_0^q v_1^2(r) dr\right) \right\} dq \Bigg\rangle \quad (3.3.18)
 \end{aligned}$$

Перехід від зв'язаної системи координат до інерціальної здійснимо використовуючи перше та друге наближення кутів після їх знаходження за другим наближенням швидкості відповідно:

- для кутів

$$\theta_2 = \theta_0 + \int_0^t [\omega_{x2} - \omega_{y2} \sin \psi_1 + \omega_{z2} \sin \theta_1 \operatorname{tg} \psi_1] d\tau; \varphi_2 = \varphi_0 + \int_0^t \left[\omega_{y2} - \frac{\omega_{z2} \sin \theta_1}{\cos \psi_1} \right] d\tau; \psi_2 = \psi_0 + \int_0^t [\omega_{y2} \sin \theta_1 + \omega_{z2} \cos \theta_1] d\tau;$$

- для координат

$$\begin{bmatrix} x_{g2} \\ y_{g2} \\ z_{g2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{g0} \\ y_{g0} \\ z_{g0} \end{bmatrix} + \int_0^t \begin{bmatrix} v_{x2} \cos \varphi_2 \cos \psi_2 + v_{y2} (\sin \varphi_2 \sin \theta_2 - \cos \varphi_2 \sin \psi_2 \cos \theta_2) + v_{z2} (\cos \varphi_2 \sin \psi_2 \sin \theta_2 + \sin \varphi_2 \cos \theta_2) \\ v_{x2} \sin \psi_2 + v_{y2} \cos \psi_2 \cos \theta_2 - v_{z2} \cos \psi_2 \sin \theta_2 \\ -v_{x2} \sin \varphi_2 \cos \psi_2 + v_{y2} (\sin \varphi_2 \sin \psi_2 \cos \theta_2 + \cos \varphi_2 \sin \theta_2) + v_{z2} (\cos \varphi_2 \cos \theta_2 - \sin \varphi_2 \sin \psi_2 \sin \theta_2) \end{bmatrix} d\tau.$$

Далі нескладно переконатись, якщо задавати початкові кути і швидкості як значення то далі за алгоритмом можна отримувати вирази їх функцій. Швидкість збіжності цієї послідовності наближень досліджувалась у [33] для більш складних випадків. Представлений алгоритм реалізовано в Visual Studio на мові C#.

Для порівняння і вивчення придатності до імітаційного моделювання процесів виконання операцій із залученням БПЛА у побуті залучено алгоритм знаходження наступного наближення із відносною точністю 0,001. Данні розрахунків для 10 точок часу представлено у таблиці 3.1. Матеріал, що було застосовано для будови алгоритму взято за основу за результатами прослуховування курсів «Наукові основи робототехніки» та «моделі алгоритмізація і системи автоматизованого керування» з урахуванням запропонованих у цьому розділі спрощень та припущень і спрощеної моделі (3.3.18). Проведені розрахунки, що подано у табличній формі формують уяву про зміну траєкторії руху та швидкості у діапазоні тягових властивостей рушіїв від 300Н до 600Н.

Таблиця 3.1. Часові зміни параметрів руху БПЛА ($R_x=300Н$)

n	x	y	V_x	V_y
0	4,6901916686636	11,175073684809	0,918910331501273	0,242208070774381
1	4,73612982206898	11,1871994155404	0,92249675428435	0,243378616918302
2	4,7822462001618	11,1993834373584	0,926068557711188	0,244546013455375
3	4,82854007444337	11,2116255871007	0,92962577470338	0,245710184622778
4	4,87501071800212	11,2239256980942	0,933168437396622	0,246871058362653
5	4,92165740546632	11,2362836003578	0,936696577033606	0,248028566544505
6	4,96847941295177	11,2486991208141	0,940210223862637	0,249182645173531
7	5,01547601800497	11,2611720835105	0,943709407042352	0,250333234584042
8	5,06264649954197	11,273702309849	0,947194154552947	0,251480279617267
9	5,10999013778331	11,2862896188242	0,950664493114225	0,252623729782821

Таблиця 3.2 Часові зміни параметрів руху БПЛА ($R_x=500H$)

n	x	y	V_x	V_y
0	7,51898328408328	11,2131878117724	1,42434769125577	0,254922823484423
1	7,59009306712416	11,2259593344093	1,42905400159503	0,256227426561255
2	7,66143597425122	11,2387957294632	1,43373109285712	0,257527259814013
3	7,73301055577464	11,2516967416036	1,43837911522917	0,25882209871875
4	7,80481536954051	11,2646621046076	1,44299821925261	0,260111723200454
5	7,87684898093359	11,2776915416224	1,44758855562331	0,26139591817304
6	7,9491099628703	11,2907847654547	1,45215027499514	0,262674474063245
7	8,02159689578212	11,3039414788838	1,45668352778733	0,263947187316885
8	8,09430836758982	11,3171613749992	1,46118846399634	0,26521386088602
9	8,16724297366852	11,3304441375611	1,46566523301283	0,26647430469562

Таблиця 3.3 Часові зміни параметрів руху БПЛА ($R_x=600H$)

n	x	y	V_x	V_y
0	8,85735529907212	11,2462006399583	1,6520373962069	0,265926432430278
1	8,93978165903664	11,2595313203767	1,65706646168678	0,267350733297687
2	9,02245675013929	11,2729328312349	1,66205923202191	0,268769906116004
3	9,1053787724461	11,2864048859215	1,66701590485562	0,270183548101467
4	9,18854593888754	11,2999471843614	1,67193671759528	0,271591345473845
5	9,27195647424012	11,3135594104842	1,67682190732367	0,272992980370808
6	9,35560861520169	11,3272412325978	1,68167171201967	0,274388138546212
7	9,43950061041904	11,340992303617	1,68648637032883	0,275776510012594
8	9,52363072050415	11,3548122613238	1,69126612133535	0,27715778967015
9	9,60799721803917	11,368700728658	1,69601120433623	0,278531677920675

В таблицях 3.1-3.3 подано динаміку змін таких окремих параметрів руху як координати X та Y та швидкостей V_x та V_y у проміжок часу від $5c$ до $6c$ для сили

R_y 100Н із початковою висотою 10 м. Інші параметри, у зв'язку з їх незначними змінами, не представлялась у цих таблицях.

3.4 Особливості формування системи керування побутовим БПЛА

А. Головні проблеми надійного польоту БПЛА

Спроби побутового використання дронів означили проблеми при їх експлуатації. Загальними з них, що притаманні для усіх типів є малий час польоту, проблеми із захистом зв'язку, складність керування та неточності системи керування. Більшість дослідників визначає першочерговість стабілізації висоти, що забезпечує якість його польоту. Вирішення даних проблем буде актуальним для БПЛА, які передбачається використовувати у побуті також як і у сільському господарстві, рятувальних операціях, будівництві та інших галузях застосування. Як видно із побудованих у розділі 3.3 основної моделі та запропонованої її спрощеному варіанту реалізація рухів здійснюється шляхом поворотів на три кути Ейлера. Поворот об'єкту, що піднято у повітря (тобто стабілізована підйомна сила) відбувається за рахунок зміни швидкості приводних гвинтів. Для цього необхідно, щоб всі привідні двигуни працювали з однаковою кутовою швидкістю, а для повороту один з них збільшує кутову швидкість. Однак у наслідок нахилу апарату проекція сил на вертикальну вісь падає і, тоді потрібно це зменшення компенсувати.

Б. Системи стабілізації і керування польотом БПЛА.

Однією із ключових проблем використання дронів у побуті є нестабільність зовнішнього середовища а також і нестійкість самого польоту у повітрі. Простою задачею стабілізації дрону є зміна відповідного кута нахилу, що здійснюється за рахунок частоти обертання валу приводу. За головним законом динаміки обертального руху, регулювати можливо лише другу похідну величини кута бо можливо регулювати тільки електричний момент зміною сили струму.



Рисунок 3.4.1 – Блок – схема системи керування побутового БПЛА

Система керування БПЛА пропонується у наступному складі: бортовий контролер польоту, системи датчиків для вимірювання та аналізу даних про об'єкти, гіроскоп, акселерометри кутове положення, висоту польоту, частоту приводних двигунів, захоплювач, відео камеру та регулятора. Стабілізацію польоту дрону забезпечує контролер польоту модуля передачі даних та вбудовані регулятори і драйвери [29]. Основна задача системи автоматичного управління (САУ) БПЛА — миттєво реагувати на зміни кутів тангажу, рискання та крену дрону і регулювати кутові швидкості приводних двигунів. Основні вимоги до систем стабілізації положення включають високу швидкодію та точність. На більшості дронів до складу системи датчиків входять трьохосьовий гіроскоп, трьохосьовий акселерометр (наприклад, MPU 6050), та магнітометр. Цей датчик вимірює поточні кути Ейлера квадрокоптера – крен, тангаж та рискання. За його показами визначається різницю між діючим прискоренням об'єкту та гравітаційним прискоренням. Сигнали про показники даних сенсорів щодо поточного положення передаються до контролера польоту і до регулятора швидкості. Основним регулятором, який використовується в дронах цивільного призначення, є PID-регулятор. Структурна схема PID-регулятора представлена на рис. 3.4.2.

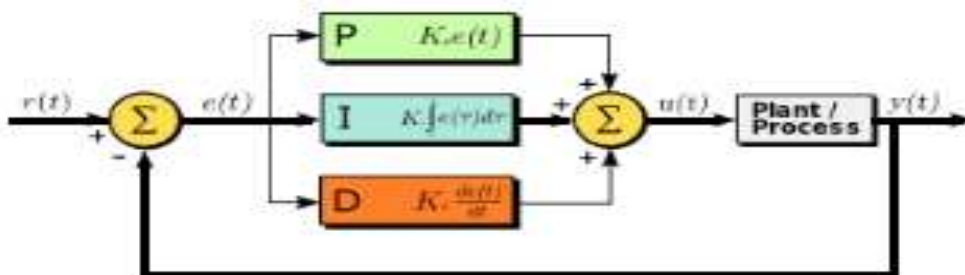


Рисунок 3.4.2 – Структурна схема PID-регулятора.

Частіше за все регулятор є невід'ємним від програмного коду контролера польоту, що як замкнена система керування формує керуючий вплив, що синтезовано за заданим критерієм відхилення, який наприклад мінімізується. Схема роботи PID-регулятора на дроні приводиться на рис.3.4.3.



Рисунок 3.4.3 – Схема PID-регулятора дрону.

На рисунку 3.4.2 схематично показано, як за допомогою регулювання коефіцієнтів пропорційної, інтегральної та диференційної складових досягається максимальна точність, тобто мінімальне відхилення реального сигналу польоту від заданого. На рис. 3.4.3 зображена реалізація регулювання вихідними координатами дрону за допомогою PID-регуляторів, реалізованих програмним кодом. Для забезпечення якісної стабілізації дронів з PID-регулятором необхідно синтезувати коефіцієнти складових регулятора відповідно до одного з критеріїв регулювання.

Для забезпечення точності часто використовують налаштування на місці з урахуванням повного навантаження на дрон, включаючи встановлене додаткове

обладнання. На рисунку 3.4.4 наведено експериментальний графік залежності кутової швидкості вхідної координати — рискання [38]. На графіку присутні ділянки, які суттєво відрізняються від заданого параметру, але в цілому даний регулятор забезпечує досить якісні характеристики, точність яких задовольняє більшість вимог, що до нього висуваються.



Рисунок 3.4.3 – Графік залежності бажаної та фактичної координати дрону PID-регулятора [38].

Крім регуляторів, які напряду впливають на керуючі сигнали привідних двигунів, на стабілізацію впливає тип та якість акумуляторів живлення дрону, оскільки різкі зміни навантаження на батарею викликає просадки напруги, що негативно впливає на PID регулювання і відповідно на стабілізацію польоту БПЛА.

Основними перевагами використання регуляторів типу PID для БПЛА є простота порівняно з іншими подібними системами, відносна дешевизна та достатня точність для стабільного польоту некритичних БПЛА. Серед останніх розробок у сфері стабілізації польоту БПЛА виділяються системи стабілізації з інтеграцією сенсорів на базі нейронних мереж або нечітких регуляторів. Використання регуляторів на основі нейронних мереж передбачає побудову більш складного програмного алгоритму та розробку умов працездатності системи.

Перевагами таких регуляторів є гнучкість налаштування, можливість тренування системи та самостійна оптимізація – тривалий процес навчання нейронної мережі дозволяє отримати найкращі результати вихідних даних.

Нейрорегулятори позиціонуються як альтернатива PID-регуляторам. Для системи польоту квадрокоптера вхідними даними є інформація з датчиків поточного положення квадрокоптера – кути крену, тангажу та рискання. Вхідними нейронами нейрорегулятора є поточні значення про положення об'єкта в просторі. Проміжними нейронами виступають алгоритми зміни кутових швидкостей відповідно до зміни кутів руху коптера. Вихідними нейронами є керуючі сигнали для приводних двигунів, які надходять до контролера польоту для визначення параметрів поточної потужності кожного двигуна.

3.5 3D-модель для імітаційного моделювання побутового БПЛА

Після погодження алгоритму роботи та функціональної схеми було створено 3D-модель орієнтовного БПЛА (Рисунок 3.5.1) для подальшого імітаційного моделювання. Було використано програму Blender, яка призначена для створення тривимірної комп'ютерної графіки [42]. Blender має декілька переваг, зокрема невеликий розмір, доступність на різних платформах та повний безкоштовний набір функцій, таких як засоби моделювання, рендер, створення анімацій та інші.



Рисунок 3.5.1 – 3D-модель побутового БПЛА

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Спрощення моделі руху для коптерів із застосуванням припущень про відношення сил ваги і Архімеда і параболічну залежність сили опору від швидкості, звело диференціальну математичну модель до рекурентної послідовності алгебраїчних виразів функцій часу для усіх кінематичних параметрів. Її збіжність дуже швидка і вона придатна до обчислень на простих контролерах типу Arduino.
2. Застосування цієї наближеної моделі допускає розрахунок параметрів PID регулятора.
3. Система керування роботою побутового БПЛА повинна включати додатковий блок керування захоплювачем вантажу.
4. Для імітаційного моделювання необхідно створити 3D вигляд БПЛА та інфраструктури системи доставки товарів.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Факультет комп'ютерних наук

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

т. в. о завідувача кафедри АКІТ

кандидат технічних наук, доцент

_____ М.І. Сіделєв

«___» _____ 2024 р

МАГІСТЕРСЬКА НАУКОВА РОБОТА

**АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ПОВІТРЯНИХ ДРОНІВ ПОБУТОВОГО
ПРИЗНАЧЕННЯ**

Спеціальна частина з охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях

151 – МНР – 671. 2203710

Студента

_____ Г.Ю. Терещенко

«___» _____ 2024 р.

Керівник доктор техн. наук, професор

_____ О.М. Трунов

«___» _____ 2024 р.

Консультант доктор біо. наук, професор

_____ Григор'єва Л.І.

«___» _____ 2024 р.

Миколаїв – 2024

4 УРАХУВАННЯ ПИТАНЬ ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПОВІТРЯНИХ ДРОНІВ ПОБУТОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У даному розділі роботи розглянуті питання охорони праці при проектуванні та реалізації автоматизованої системи повітряних дронів побутового призначення. Виконана інтегральна оцінка умов праці, на основі якої були запропоновані заходи на покращення умов праці.

4.1 Опис обраного виробничого приміщення, робочих місць, їх обладнання та складання вихідних даних для кількісної оцінки умов праці

Проектування автоматизованого дрона, виконувалося в офісному приміщенні. Воно було обране через те, що там розроблялася частина коду для плати Arduino та програмування й налаштування двигунів. Тому необхідно зробити огляд та аналіз умов праці на виробничому об'єкті.

Офісне приміщення №19 розташоване на першому поверсі у м. Миколаєві на вулиці В'ячеслава Чорновола 8Д. Приміщення має загальну площу 24 м², відповідно має розміри $a \times b \times c = 6 \times 4 \times 2.3$ м.

Вікна виходять на північну сторону. В офісі зроблено якісний ремонт, встановлені вхідні дерев'яні двері. Два віконних отвору заповнені металопластиковими вікнами з прозорим двокамерним склопакетом. Підлогове покриття в - комерційний лінолеум.

У приміщенні розміщено 6 робочих місць, кожне з яких обладнано персональними комп'ютерами; є маршрутизатор Wi-Fi; в загальному користуванні наявне друкуюче обладнання, а саме: лазерний принтер, сканер та копіювальний пристрій. На стіні є магнітно-маркерна дошка. Біля виходу стоїть бак для води, стіл з мікрохвильовою піччю та електричним чайником.

Загальний вид обраного офісного приміщення наведено на рисунку 4.1. Напруга джерела живлення техніки – 220 В. У приміщенні за правилами техніки безпеки знаходиться вогнегасник, а також офісне приміщення оснащено системою вентиляції.



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд виробничого приміщення

Для підтримання комфортних мікрокліматичні умов приміщення обладнане системою опалення, кондиціонування повітря .

В темний період дня відчувається дискомфорт, пов'язаний з освітленням.

Вимоги до електробезпеки в обраному приміщенні відповідає вимогам НПАОП 0.00-1.28-10 [44].

Після здійснення необхідних вимірювань та обстежень було проаналізовано та здійснена оцінка умов праці в обраному виробничому приміщенні (табл. 4.1).

4.1.1 Інтегральна оцінка умов праці в обраному виробничому приміщенні

Для інтегральної оцінки умов праці [45] в обраному приміщенні треба застосувати вхідні дані, які подані в таблиці 1 та здійснити оцінку кожного з факторів трудового процесу за критеріями бальної оцінки.

Таблиця 4.1 – Фактори умов праці в офісному приміщенні

№ з/п	Фактор умов праці на робочому місці	Значення показника	Тривалість дії фактору, хв.
1	Температура повітря на робочому місці (РМ) у виробничому приміщенні, °С: - теплий період - холодний період	23	300
		-	-
2	Відносна вологість повітря на РМ, %	65	480
3	Швидкість руху повітря на РМ, м/с	0,3	420
4	Освітленість на РМ, $\mu\text{к}$	140	360
5	Мінімальний розмір об'єкта розпізнавання, мм	0,5	360
6	Виробничий шум, дБА	50	420
7	Інтенсивність теплового випромінювання, Вт/м ²	160	420
8	Токсична речовина, озон, кратність перевищення ГДК	1,4	480
9	Виробничий пил (паперовий та ін.), кратність перевищення ГДК	0,5	360
10	Робоче місце (РМ), поза та переміщення у просторі	Робоче місце стаціонарне, поза не вільна, до 25 % часу зміни у нахиленому положенні до 30°	360
11	Кількість важливих об'єктів спостереження	1	420
12	Тривалість зосередженого спостереження, % часу зміни	50	360
13	Тривалість повторюваних операцій, с	50	360
14	Змінність роботи	Ранкова зміна	480
15	Тривалість безперервної роботи за добу, годин	6	360
16	Режим праці та відпочинку	Обґрунтований, без включення музики та гімнастики	480
17	Нервово-емоційне навантаження	Прості дії за заданим планом з можливістю корегування	420
18	Кількість рухів пальців на годину	400	360

У таблиці 4.2 наведені параметри, що необхідні для інтегральної оцінки умов праці:

x_{n_i} – нормативне значення i – того фактору умов праці (прийняті значення відповідають оптимальному (допустимому) класу умов праці згідно з Гігієнічною класифікацією [46]);

$x_{аб_i}$ – дійсне значення i – того фактору умов праці (відповідно до даних табл. 1);

x_{x_i} – оцінка i – того фактору умов праці (відповідно до даних додатку Г даного розділу роботи), балів;

t_i – тривалість дії i – того фактору умов праці (відповідно до даних табл. 3.1), хв.;

t_{num_i} – відносна тривалість дії i – того фактору умов праці (за прийнятої тривалості робочої зміни $t_p = 480$ хв.), хв., тобто:

$$t_{num_i} = \frac{t_i}{t_p} = \frac{t_i}{480}; \quad 1.1$$

x_{ϕ_i} – фактична оцінка питомої ваги i – того фактору умов праці, балів, а саме:

$$x_{\phi_i} = x_{x_i} t_{num_i} = x_{x_i} \frac{t_i}{480} \quad 1.2$$

За даними таблиці 2 визначаємо елемент умов праці, який одержав у балах найбільшу оцінку x_{max} .

Найбільшу кількість балів отримав елемент x_2 , який пов'язаний з відносною вологістю повітря на робочому місці, %, тобто $x_{max} = x_2 = 3$. Даний елемент вважається визначаючим.

Таблиця 4.2 – Параметри, що необхідні для розрахунку інтегральної бальної оцінки умов праці на робочому місці

№ з/п	Фактор умов праці на робочому місці	Нормоване значення фактору у $x_{нi}$	Оцінка фактору		Тривалість дії фактору		Фактична оцінка питомої ваги фактору x_{fi}
			Абсолют на $x_{абi}$	У балах x_{xi}	Хвилин t_i	У долях робочої зміни $t_{пит i}$	
1	Температура повітря на робочому місці (PM) у виробничому приміщенні, °С - теплий період - холодний період	23...25	23	1	300	0,625	0,625
		21...23	-	-	-	-	-
2	Відносна вологість повітря на PM, %	40..60	65	3	480	1	3
3	Швидкість руху повітря на PM, м/с	<0,2	0,3	2	420	0,875	1,75
4	Освітленість на PM, лк	200	160	3	360	0,75	2,25
5	Мінімальний розмір об'єкта розпізнавання, мм	>1	0,5	2	360	0,75	1,5
6	Виробничий шум, дБА	50	40	3	180	0,375	1,125
7	Інтенсивність теплового	≤140	160	2	420	0,875	1,75

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
 Автоматизовані системи повітряних дронів побутового призначення

	випромінювання, Вт/м ²						
8	Токсична речовина, озон, кратність перевищення ГДК	≤1	1	2	480	1	2
9	Виробничий пил (паперовий), кратність перевищення ГДК	≤1	0,5	2	360	0,75	1,5
10	Робоче місце (РМ), поза та переміщення у просторі	РМ стаціо нарне, маса перемі щення до 5 кг	РМ стаціо нарне, поза не вільна, до 25 % часу у нахилено му положен ні до 30°	3	360	0,75	2,25

Далі розраховується:

1. Середній бал усіх елементів крім визначаючого \bar{x} , балів:

11	Кількість важливих об'єктів спостереження	<5	1	1	420	0,875	1,875
12	Тривалість зосередженого спостереження, % часу зміни	<25	50	2	360	0,75	1,5
13	Тривалість повторюваних операцій, с	>100	50	2	360	0,75	1,5
14	Змінність роботи	Ранкова	Ранкова	1	480	1	1
15	Тривалість безперервної роботи за добу, годин	<8	6	2	360	0,75	1,5
16	Режим праці та відпочинку	Обґрунтований з вкл.. музики та гімнастик и	Обґрунтований, без включення музики та гімнастики	2	480	1	2
17	Нервово-емоційне навантаження	Прості дії за індивідуальним планом	Прості дії за заданим планом з можливістю корегування	2	420	0,875	1,75
18	Кількість рухів пальців на годину	<360	400	2	360	0,75	1,5

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_{\phi_i}}{n-1},$$

2.1

де n – фактична кількість врахованих елементів умов праці (у даному випадку $n = 18$).

Тоді:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_{\phi_i}}{n-1} = 1.6 \quad 2.2$$

2. Інтегральна бальна оцінка умов праці на робочому місці у відділі програмного забезпечення I_n , балів.

$$I_n = 10 \cdot \left(x_{max} + \bar{x} \frac{6-x_{max}}{6} \right) = 10 \cdot \left(3 + 1.6 \frac{6-3}{6} \right) = 38 \quad 2.3$$

Отримане значення інтегральної оцінки умов праці було проаналізовано і порівняно зі значеннями, наведеними в додатку А. Значення інтегральної оцінки відноситься до категорії.

Згідно даними додатку Б умови праці на визначеному робочому місці відносяться до III категорії.

4.1.3 Оцінка ефективності заходів щодо покращення умов праці

Пропонується до всіх факторів умов праці, бальна оцінка яких перевищує значення $x_{x_i} = 2$, вжити заходи (надати рекомендації) з метою досягнення кожним із розглянутих елементів умов праці саме зазначеного вище значення ($x_{x_i} = 2$).

За даними таблиці 4.2 визначаємо інтегральний показник важкості праці за формулою, що використовується, коли умови праці оцінюються балами «1» або «2»:

$$I_{n_2} = 19,7 \cdot \bar{x} - 1,6 \cdot \bar{x}^2, \quad 3.1$$

де

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}. \quad 3.2$$

Тоді для даних умов праці згідно таблиці 4.2 маємо:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = 1.60 \quad 3.3$$

$$I_{n_2} = 19.7 \cdot \bar{x} - 1.6 \cdot \bar{x}^2 = 19.7 \cdot 1.60 - 1.6 \cdot 1.60^2 = 31.5 - 4.1 = 27.4$$

Відповідно до даних, наведених у додатку Б, отримане значення інтегрального показника $I_{n_2}=27.4$ балів, відповідає II категорії умов праці, а саме це такі роботи, що виконуються в умовах, які відповідають гранично допустимим концентраціям (ГДК) і рівням (ГДР) санітарно-гігієнічних елементів, а також допустимим рівням психофізіологічних факторів.

Інтегральний показник важкості праці дозволяє визначити вплив умов праці на працездатність людини у такій послідовності:

1. Ступінь втоми працівника на визначеному робочому місці B , у. о.

$$B = \frac{I_n - 15,6}{0,64}, \quad 4.1$$

де чисельні значення 15,6 і 0,64 – це коефіцієнти регресії.

Тоді:

– до впровадження комплексу заходів з охорони праці коефіцієнт втоми складає

$$B_1 = \frac{I_n - 15.6}{0.64} = \frac{38 - 15.6}{0.64} = 35 ; \quad 4.2$$

– після впровадження комплексу заходів з охорони праці коефіцієнт втоми складає

$$B_2 = \frac{I_{n_2} - 15.6}{0.64} = \frac{27.4 - 15.6}{0.64} = 18.4. \quad 4.3$$

2. Рівень працездатності людини P , у. о.

$$P = 100 - B.$$

Тоді:

– до впровадження комплексу заходів з охорони праці рівень працездатності складає

$$P_1 = 100 - B_1 = 100 - 35 = 65; \quad 4.4$$

– після впровадження комплексу заходів з охорони праці рівень працездатності складає

$$P_2 = 100 - B_2 = 100 - 18,475 = 81,5; \quad 4.5$$

3. Зміна продуктивності праці ΔP , %.

$$\Delta P = 0,2 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right) \cdot 100 = 0,2 \cdot \left(\frac{81,5}{65} - 1 \right) \cdot 100 = 5,1\%. \quad 4.6$$

4.2 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

4.2.1 Пожежна безпека

У сучасних комп'ютерах елементи електронних систем розташовані дуже щільно, включаючи сполучні дроти та комунікаційні кабелі, що може підвищити ризик загорянь. Це може призвести до плавлення ізоляції дротів, їх оголення і, як наслідок, коротких замикань, які супроводжуються іскрінням і можуть спричинити небезпечні перевантаження електронних схем. При перегріванні елементи можуть згоріти, розкидаючи іскри.

Системи вентиляції відводять надлишкове тепло від комп'ютерів, але також становлять додаткову пожежну небезпеку для приміщень. Вентиляція постачає кисень, який сприяє горінню, і може швидко поширювати вогонь та продукти

згоряння по всіх приміщеннях. Струм подається до електроустановок через кабельні лінії, які є особливо пожежонебезпечними через наявність горючої ізоляції, можливих джерел запалювання у вигляді іскор та дуг, а також через складність доступу до них.

У разі пожежі автоматично спрацьовують установки пожежогасіння (АУП), найчастіше газові, які оснащені світловою та звуковою сигналізацією. Щоб запобігти поширенню вогню з однієї частини будівлі на іншу, встановлюються протипожежні бар'єри: стіни, перегородки, перекриття, зони, тамбури-шлюзи, двері, вікна, люки, клапани. У будівлях передбачається не менше двох евакуаційних виходів, але евакуаційні шляхи не повинні проходити через машинний зал, якщо він має менше двох виходів.

Проходи, коридори та робочі місця не слід захаращувати папером або архівними матеріалами. На евакуаційних шляхах встановлюють природне та аварійне освітлення. В інших виробничих приміщеннях допускається один вихід, якщо відстань до нього не перевищує 25 м, а кількість працівників не більше 25 осіб. Для зберігання носіїв інформації використовуються вогнетривкі металеві шафи, а двері в сховищах також повинні бути вогнетривкими. Комплекс організаційних і технічних заходів пожежної профілактики дозволяє запобігти пожежі, забезпечити безпеку людей, обмежити поширення вогню та створити умови для успішного гасіння.

4.2.2 Дії в умовах надзвичайних ситуацій воєнного характеру

Загроза військового вторгнення робить питання безпеки людей у надзвичайних ситуаціях воєнного характеру дуже актуальним. Воєнний час характеризується великою кількістю звичайної зброї та можливістю застосування зброї масового знищення, що може мати руйнівний вплив, порівнянний зі стихійними лихами.

При першій можливості слід разом із сім'єю покинути небезпечну зону. Якщо це неможливо, необхідно відправити дітей і літніх родичів до знайомих чи родичів. Важливо взяти з собою всі документи, коштовності та цінні папери.

Готуватись до можливого перебування в зоні надзвичайної ситуації варто заздалегідь. Необхідно підготувати "екстрену валізку" з речами, які можуть знадобитися під час перебування в зоні НС або евакуації в безпечні райони. Важливо зберігати спокій і не реагувати на провокації. Не можна розповідати про свої плани малознайомим людям або тим, хто має ненадійну репутацію.

Рекомендується вживати наступних заходів [52]:

1. Завжди мати при собі документи, що засвідчують особу (паспорт), інформацію про групу крові свою та близьких родичів, а також можливі проблеми зі здоров'ям (наприклад, алергії на медичні препарати).
2. Знати місцезнаходження захисних споруд цивільної оборони поблизу місця проживання, роботи, а також у місцях частого відвідування (магазини, базари, дорога до роботи, медичні заклади тощо).
3. При виході з приміщень, пересуванні сходами багатоповерхівок або до споруди цивільної оборони дотримуватись правила правої руки, щоб уникнути тисняви. Уникати місць скупчення людей.
4. Не вступати в суперечки з незнайомими людьми і уникати можливих провокацій.

5. У разі отримання інформації від органів державної влади про можливу небезпеку або заходи щодо підвищення безпеки, передавати її іншим людям (за місцем проживання, роботи тощо).
6. При появі озброєних людей, військової техніки або заворушень негайно покинути цей район.
7. Посилити увагу і за можливості залишити район у разі появи засобів масової інформації агресора.
8. Якщо помітите людей, які не орієнтуються на місцевості, розмовляють з акцентом, мають незвичну зовнішність, здійснюють протиправні або провокативні дії, негайно повідомити про це органи правопорядку, місцеву владу або військових.
9. У разі потрапляння в район обстрілу ховатись у найближчу захисну споруду. Якщо таких споруд немає, використовувати нерівності рельєфу (канави, окопи, заглиблення від вибухів).
10. При раптовому обстрілі лягти на землю, голову прикрити руками або валізою. Не виходити з укриття до кінця обстрілу.
11. Надавати першу допомогу пораненим, викликати швидку допомогу, представників ДСНС, правоохоронців або військових.
12. Якщо стали свідком поранення або смерті людей, протиправних дій щодо них (арешт, викрадення, побиття), спробувати запам'ятати і зберегти якнайбільше інформації про ці події для подальшого розслідування та надання допомоги.

ВИСНОВКИ ДО ЧЕТВЕРТОГО РОЗДІЛУ

Згідно з даними додатків А та Б умови праці на визначеному робочому місці відносяться до III категорії, коли спостерігається відхилення від ГДК і ГДР факторів трудового процесу та допустимих величин психофізіологічних факторів.

Для покращення умов праці пропонується приділити увагу клімат-контролю у приміщенні, щоб значення показника вологості відповідало нормам здорового робочого процесу. Шум та відволікаючі фактори можна зменшити за рахунок позмінного відкриття вікон. Оскільки вони мають чудову звукоізоляцію, на час активної роботи в офісі їх можна закривати, щоб звуки вулиці не відволікали від роботи, а під час перерв – відкривати, щоб наситити приміщення свіжим повітрям. Також, під час роботи за комп'ютером можна робити невеликі перерви, щоб очі і тіло відпочили. Рекомендується зробити зарядку для очей та вправи для розминки м'язів шиї і спини.

Після впровадження комплексу заходів з охорони праці розрахунки довели, що проведені заходи призведуть до зменшення важкості праці з III до II категорії, і тим самим буде знижено втому, а також можуть призвести до підвищення працездатності.

Також у даному розділі кваліфікаційної роботи розглянуто загальні питання забезпечення безпеки персоналу лабораторії під час надзвичайної ситуації внаслідок порушень вимог пожежної безпеки, а також в умовах воєнного стану.

ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ

1. Розвиток автоматизованих систем керування (АСК) для використання БПЛА в побуті вимагає перегляду вимог до їх конструкції та функціональної структури. Реалізація ідеї впровадження безлюдних технологій для переміщення об'єктів у побуті за допомогою БПЛА неможлива без розробки АСК. Ефективне функціонування таких систем у побуті, заснованих на безлюдних технологіях, є комплексним завданням, що включає впровадження як наземних, так і повітряних апаратів і засобів.

2. Розроблено комплексну архітектуру АСК та на її основі створено функціональну схему АСК ТП, яка передбачає використання власних та існуючих сервісів. Враховуючи досвід Amazon, пропонується залучати до складу сервісів БПЛА, наземні електрокари та роботи-вантажники з розвиненими послугами. Запропонований підхід, представлений функціональними та блок-схемами разом з аналітичними методами для оцінки ефективності діяльності вузла побутового застосування операцій із залученням повітряних і наземних робототехнічних засобів, забезпечує побудову математичної моделі АСК ТП побутових послуг. Комплексне використання пов'язаних мережею наземних та повітряних дронів розширює типи можливих послуг, суттєво підвищує їх ефективність і усуває частину правових протиріч із приватною власністю та її власниками. Це, у підсумку, сприятиме широкому впровадженню безлюдних технологій у побуті завдяки АСК.

3. Спрощення моделі руху для коптерів із використанням припущень про відношення сил ваги і Архімеда та параболічну залежність сили опору від швидкості звело диференціальну математичну модель до рекурентної послідовності алгебраїчних виразів функцій часу для всіх кінематичних параметрів. Її збіжність дуже швидка, що робить її придатною для обчислень на простих контролерах типу Arduino. Використання цієї наближеної моделі дозволяє розраховувати параметри PID-регулятора. Система керування побутовим БПЛА повинна включати додатковий блок керування захоплювачем вантажу. Для

імітаційного моделювання необхідно створити 3D-модель БПЛА та інфраструктури системи доставки товарів.

4. Згідно з додатками А та Б, умови праці на визначеному робочому місці відносяться до III категорії, через відхилення від ГДК і ГДР факторів трудового процесу та допустимих величин психофізіологічних факторів. Для покращення умов праці рекомендується покращити клімат-контроль у приміщенні, щоб вологість відповідала нормам здорового робочого процесу. Шум та відволікаючі фактори можна зменшити через позмінне відкриття вікон, які забезпечують звукоізоляцію під час активної роботи та доступ свіжого повітря під час перерв. Також рекомендується робити перерви під час роботи за комп'ютером для відпочинку очей і тіла, виконувати зарядку для очей та вправи для м'язів шиї і спини. Впровадження цих заходів з охорони праці дозволить знизити важкість праці з III до II категорії, зменшити втому та підвищити працездатність.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Tesla Autopilot: What is it and how does it work? Here's everything you may want to know Read more at: https://economictimes.indiatimes.com/news/international/us/tesla-autopilot-what-is-it-and-how-does-it-work-heres-everything-you-may-want-to-know/articleshow/101601035.cms?utm_source=contentofinterest&utm_medium=text&utm_campaign=cppshttps://economictimes.indiatimes.com/news/international/us/tesla-autopilot-what-is-it-and-how-does-it-work-heres-everything-you-may-want-to-know/articleshow/101601035.cms?from=mdr (Date of Application : 25.02.2024).
2. Under the Hood of Uber ATG's Machine Learning Infrastructure and Versioning Control Platform for Self-Driving Vehicles. <https://www.uber.com/en-UA/blog/machine-learning-model-life-cycle-version-control/> March 4, 2020 / Global/ (Date of Application : 28.02.2024).
3. A. Pequeño-Zurro *et al.*, "Proactive Control for Online Individual User Adaptation in a Welfare Robot Guidance Scenario: Toward Supporting Elderly People," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 53, no. 6, pp. 3364-3376, June 2023, doi: 10.1109/TSMC.2022.3224366. keywords: {Robots;Older adults;Legged locomotion;Behavioral sciences;Navigation;Visualization;Adaptation models;Adaptive behavior;guide robot;human–robot interaction;neural control;service mobile robot;social robot;welfare robot},
4. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL – EASA – [Електронний ресурс] – Режим доступу:
https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/Communication_Commission_Drones.pdf – Дата доступу: 29/06/2023.
5. Civil drones – EASA – [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/civil-drones-rpas> – Дата доступу: 09/06/2017.

6. DroneRules – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://dronerules.eu/en/> – Дата доступу: 29/06/2023.

7. 'Prototype' Commission Regulation on Unmanned Aircraft Operations – EASA – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/UAS%20Prototype%20Regulation%20final.pdf> – Дата доступу: 29/06/2023.

8. National RPAS Regulations – Eurocontrol – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.eurocontrol.int/articles/national-rpas-regulations> – Дата доступу: 29/06/2023.

9. Advisory Circular – Federal Aviation Administration – [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.faa.gov/uas/media/AC_107-2_AFS-1_Signed.pdf – Дата доступу: 29/06/2023.

10. United States Court of Appeals – [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://www.cadc.uscourts.gov/internet/opinions.nsf/FA6F27FFAA83E20585258125004FBC13/\\$file/15-1495-1675918.pdf](https://www.cadc.uscourts.gov/internet/opinions.nsf/FA6F27FFAA83E20585258125004FBC13/$file/15-1495-1675918.pdf) – Дата доступу: 29/06/2023.

11. Правила гарного дрону – Ахон – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://axon.partners/uk/uncategorized/the-rules-of-good-drone/> – Дата доступу: 29/06/2023.

12. Drone.UA – Офіційний дилер продукції компанії DJI в Україні. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://drone.ua/dji/dji/?gclid=CLr72ZTUodQCFQWUsgodw50FCQ> – Дата доступу: 29/06/2023.

13. Полётный контроллер – Вікіпедія – [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Полётный_контроллер – Дата доступу: 29/06/2023.

14. PID Controller – Вікіпедія – [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller – Дата доступу: 29/06/2023.

15. Програмуємо квадрокоптер на Arduino – Habrahabr – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://habrahabr.ru/post/227425/> – Дата доступу: 29/06/2023.
16. AeroQuad Forum – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://aeroquad.com/showthread.php?951-AeroQuad-v1-8-v1-9-Shield/page7> – Дата доступу: 29/06/2023.
17. Unity – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://unity3d.com/> – Дата доступу: 29/06/2023.
18. Arduino UNO – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno> – Дата доступу: 29/06/2023.
19. Алгоритм Дейкстри – Вікіпедія – [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Дейкстри – Дата доступу: 09/09/2023. 98
20. Алгоритм Беллмана—Форда – Вікіпедія – [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Беллмана—Форда – Дата доступу: 02/06/2023.
21. Алгоритм Джонсона – Вікіпедія – [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Джонсона – Дата доступу: 09/06/2017.
22. Евристика – Вікіпедія – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Евристика> – Дата доступу: 09/06/2017;
23. OpenCV – [Електронний ресурс] – Режим доступу: opencv.org – Дата доступу: 09/09/2023
24. Патент № 20150120094 USA Unmanned Aerial Vehicle Delivery System. Airborne fulfillment center utilizing unmanned aerial vehicles for item delivery. 4/30/2015.
25. Патент № 9671791 USA. Managing unmanned vehicles. 6/01/24.
26. Патент № 9,646,502 USA. Universal unmanned aerial vehicle identification system. 5/9/2023.

27. Патент № 9,731,839 USA. Aerial vehicle delivery shroud. 8/15/2017
28. Трунов О. М., Позняков О. В., Терещенко Г. Ю. ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ДРОНІВ У АСК ПОБУТУ. Ольвійський форум – 2024 Миколаїв 2024.
29. Dykhta L.M., Trunov A. N, Zhuravska I. M. The Drone Grups as a Component of Multy Purpose Automatized Technological Complexes. Warsaw. Diamond trding tour. 2020. 56p. isbn978-83-66401-75-4
30. Trunov A., Kazan P., Alieksieiev V., Korolova O., Sliusarenko O., Dronyuk I. Functioning model of the ground robotic complex. CSIT Proc. 2021. Vol. 2. P. 128–131. DOI: 10.1109/CSIT52700.2021.9648595.
31. О. М. Трунов Рекурентна апроксимація у задачах моделювання та проектування : Монографія. Видавництво ЧНУ ім. Петра Могили, м. Миколаїв. Миколаїв, 2012. – 275 с.
32. Aleksandrow, M. N., Trunow, A. N. (1989). Metody i srodky adaptacyjnego sterowania w technice glebokowodnej. Materialy V Konferencji: Projektowanie I Budowa Obiektow Oceanotechniki. Szczecin, 53–54
33. Trunov A., Recurrent Transformation of the Dynamics Model for Autonomous Underwater Vehicle in the Inertial Coordinate System. Eastern-European Journal Enterprise Technologyies, №2/4 (86), 2017, pp. 39–47
34. Future trends, newest drone tech revealed at CES 2016. Available at: <https://www.directionsmag.com/article/1178>
35. Drones in 2018: Thought Leaders Make Predictions. Available at: <https://dronelife.com/2018/01/02/drones-2018-thought-leaders-predict-new-trends/>
36. Austin, R. Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment. Wiley, 372.
37. Trunov A. Transformation of operations with fuzzy sets for solving the problems on optimal motion of crewless unmanned vehicles. Eastern-European

Journal of Enterprise Technologies, 4 (4 (94)), 43–50. doi:
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140641>

38. Thusoo R., Jain, S., Bangia, S., (2020). PID Control of a Quadrotor. 10.1007/978-981-15-5341-7_48.

39. НПАОП 0.00-1.28-10. Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин.

40. Гетия И.Г., Леонтьева И.Н., Шумилин В.К. Методические указания по проведению занятия по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» на тему: «Определение интегральной бальной оценки тяжести труда на рабочем месте». – М.: МГАПИ, 2002. – 22 с.

41. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу // Охорона праці. – 2001. –№ 12. – С. 12-20

42. Blender [Електронне джерело] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.blender.org/> Дата доступу: 09/09/2023

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Автоматизовані системи повітряних дронів побутового призначення

ДОДАТОК А

Критерії бальної оцінки умов праці

№ п/п	Фактор умов праці на робочому місці	Оцінка, бали					
		1	2	3	4	5	6
1	Температура повітря на робочому місці (РМ) у виробничому приміщенні, °С:						
	- теплий період	23...25	26...28	29...32	33...35	35...37	>37
	- холодний період	21...23	18...20	15...17	12...14	Нижче +12	-
2	Відносна вологість повітря на РМ, %	40...50	55...60	61...75	76...85	Понад 85	-

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Автоматизовані системи повітряних дронів побутового призначення

3	Швидкість руху повітря на РМ, м/с	Менше 0,2	0,2...0,5	0,6...0,7	0,8...1,2	1,3...1,7	Понад 1,7
4	Освітленість на РМ, лк	≥ 300	240...300	160...230	100...150	60...90	30...50
5	Мінімальний розмір об'єкта розпізнавання, мм	$> 1,0$	1...0,3	$< 0,3$	0,005...0,3	$< 0,05$	-
6	Виробничий шум, перевищення ГДР, дБА	< 1	Рівно ГДР	1...5	6...10	> 10	> 10 з вібрацією
7	Інтенсивність теплового випромінювання, Вт/м ²	≤ 140	141..1000	1001...1500	1501...2000	2001...2500	> 2500
8	Токсична речовина, озон, кратність перевищення ГДК	-	≤ 1	1...2,5	2,6...4,0	4,1...6	$> 6,0$

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Автоматизовані системи повітряних дронів побутового призначення

9	Виробничий пил (паперовий), кратність перевищення ГДК	-	≤ 1	1...5	6...10	11...30	> 30
10	Робоче місце (РМ), поза та переміщення у просторі	РМ стаціонарне, поза вільна, маса переміщене вантажу ≤ 5 кг	РМ стаціонарне, поза вільна, маса переміщене вантажу > 5 кг	Робоче місце стаціонарне, поза не вільна, до 25 % часу зміни у нахиленому положенні до 30°	РМ стаціонарне, поза вимушена – до 50 % робочої зміни	РМ стаціонарне, поза вимушена, незручна – більше 50 % робочої зміни	РМ стаціонарне, поза вимушена, незручна, нахили під кутом до 60 град більше 300 разів за робочу змін
11	Кількість важливих об'єктів спостереження	Менше 5	5...10	11...25	Понад 25	-	-
	Тривалість зосередженого	Менше 25	25...50	51...75	76...85	86...90	Понад 90

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Автоматизовані системи повітряних дронів побутового призначення

12	спостереження, % часу зміни						
13	Тривалість повторюваних операцій, с	Понад 100	31...100	20...30	10...19	5...9	1...4
14	Змінність роботи	Ранкова зміна	Дві зміни	Три зміни	Нерегулярні зміни	-	-
15	Тривалість безперервної роботи за добу, годин	-	< 8	< 12	> 12	-	-
16	Режим праці та відпочинку	Обґрунтований, з включенням музики та гімнастики	Обґрунтований, без включення музики та гімнастики	Відсутність обґрунтованого режиму праці та відпочинку	-	-	-
17	Нервово-емоційне навантаження	Прості дії за індивідуальним планом	Прості дії за заданим планом з можливістю корегування	Складні дії за заданим планом з можливістю корегування	Складні дії за заданим планом при дефіциті часу	Відповідальність за безпеку людей	Індивідуальний ризик

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Автоматизовані системи повітряних дронів побутового призначення

18	Кількість рухів пальців на годину	< 360	360...720	721...1080	1081...3000	> 3000	-
----	-----------------------------------	-------	-----------	------------	-------------	--------	---

ДОДАТОК Б

Залежність категорії умов праці від величини інтегральної бальної оцінки

Діапазон інтегральної бальної оцінки	Категорія умов праці	Характер роботи
До 18	I	Роботи, що виконуються в оптимальних умовах
19...33	II	Роботи, що виконуються в умовах, які відповідають гранично допустимим концентраціям (ГДК) і рівням (ГДР) санітарно-гігієнічних елементів, а також допустимим рівням психофізіологічних факторів
34...45	III	Роботи, що відхиляються від ГДК і ГДР та допустимих рівнів психофізіологічних факторів
45,7...53,9	VI	Робота у несприятливих умовах праці
54...59	V	Роботи, що виконуються в екстремальних умовах
Понад 59	VI	Роботи, що виконуються в екстремальних умовах